

[21039]

高い放射線耐性を有する半導体素子の開発 Development of semiconductor devices with high radiation tolerance

高倉健一郎^{#A)}, 角田功^{A)}, 米岡将士^{A)},
Kenichiro Takakura^{#A)}, Isao Tsunoda^{A)}, Masashi Yoneoka^{A)}
^{A)} National Institute of Technology, Kumamoto-college

Abstract

We aim to enhance radiation tolerance of semiconductor devices, which are considered unstable to operate in a radiation environment. In particular, semiconductor devices to be mounted on robots to be used for decommissioning work at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant are required to have high radiation tolerance, and it is necessary to develop such devices as soon as possible. In this project, we evaluated the radiation tolerance of memory devices, which were found to be a major cause of instability in the operation of microcontrollers mounted on robots, focusing on the memory structure and data transfer method. It was confirmed that although the structures were made smaller and more complex to increase memory capacity, this resulted in lower radiation tolerance. It was found that the SLC memory, which has a simple device structure, should be adopted for the memory with high radiation tolerance, and that the SLC method can operate without failure up to 0.72 kGy of γ -ray irradiation dose.

Keyword: guideline, layout, font

1. はじめに

1.1 研究背景

半導体素子は、材料、構造、製作工程などの進歩により日々高性能化が進められている。高性能化した半導体素子を利用した種々の回路や機器が開発されており、利便性が高まっている。半導体の存在をなくして我々の生活が成り立たない状況となっている。

一方で、半導体素子は構造や動作原理の観点から、抵抗やコンデンサなど他の電子部品と比較して放射線照射により素子特性が大きく変化し、高照射量では破壊されることが問題となる。例えば、現在、廃炉作業が進められている福島第1原子力発電所では、作業を進めるためのロボットなどの開発、利用が進められている。開発されるロボットには多くの電子部品、アクチュエータが導入されるが、これらには多くの半導体素子が使われており、放射線照射による半導体素子特性劣化、破壊による機器の動作不良が懸念されている。このため、ロボット開発には各種機器の放射線照射耐性を評価し、スクリーニングされた機器を利用することになる。しかしながら、膨大な電子機器の候補から放射線耐性の高い機器を選定するのは非常に困難である。

半導体素子の放射線照射損傷は、これまでに多く調査されており、報告例は多い、先述したように半導体素子の放射線耐性は、素子構造や材料により予測することができるため、これらの情報を集約することで素子選定の候補を絞ることが可能となる。そこで、本課題では、ロボットなど機器で取得したデータの格納や動作プログラムなどを保存するために利用されるメモリ素子を対象として、素子構造と放射線耐性の関連を調査した。

フラッシュメモリは、集積化が可能であり、メモ

リ容量及び動作安定性の面から、現在ではハードディスクに変わる大容量メモリ Solid state drive (SSD) や可搬性に優れた Universal serial bus メモリ、SD カード等、多くの素子が開発されている。これらのデータ保持方法及び基本構造は同じで、トランジスタゲートに電荷を蓄積してデータを格納する。一つのトランジスタに格納するデータセルが 1 ビット (SLC)、2 ビット (MLC) 及び 3 ビット (TLC) と各々の保存方式が異なっている。最近では、3D NAND 方式と呼ばれるメモリセルを積層することでデータ容量を増やすメモリも実用化されている。

フラッシュメモリは、電界効果トランジスタ(Field Effect Transistor, FET)のフローティングゲート絶縁膜に電荷を蓄積し、電荷蓄積の有無により情報を記録している。フラッシュメモリに放射線が照射されると、放射線による電離効果により、蓄積した電荷の放出が起こり、書き込んだ情報が反転することが懸念される。また、高照射線量では、変位損傷によるチャネル抵抗増大も考えられ、データ転送速度などに影響を及ぼす恐れもある。したがって、放射線耐性の高いフラッシュメモリを系統的に調査し、構造や書き込み方式などと放射線耐性との関係を明らかにすることを目的として本課題に取り組むこととした。

1.2 実験方法

ロボットに搭載するマイコンとして Raspberry Pi を想定し、メモリとして micro SD カードの放射線耐性調査を行った。対象素子は、複数のメーカー、書き込み方式、データ容量となるよう書き込み方式(素子構造)が SLC, p-SLC, MLC, TLC 及び 3D-NAND の micro SD カードを選定した。メモリ容量は 16 GB または、32 GB である。

放射線源としてガンマ線(⁶⁰Co)を選定し、量子応用

[21039]

研究機構にて照射を行った。原子炉格納容器内でのロボットの積算活動時間中の被ばく量を 1 kGy と考え、照射線量を 10 Gy/h として、各素子にそれぞれ 24 h, 48 h 及び 72 h の照射を室温で行い、照射前後の Raspberry Pi 起動の有無とデータ転送速度を測定した。起動プログラムを書き込んだ照射前の micro SD カードを Raspberry Pi 2.0 本体に差し込んで、Raspberry Pi を起動し、データ転送(read/write)速度を測定する。その後、Raspberry Pi から取り出してメモリのみガンマ線照射を行った。照射後、再び Raspberry Pi に micro SD カードを差し込んで、Raspberry Pi operation system (OS)起動の確認及びデータ転送速度の測定を行った。

2. 実験結果と考察

2.1 Raspberry Pi Operation System 起動について

ガンマ線照射後に Raspberry Pi を使って micro SD カードに記録した OS 起動の有無を確認した。Table 1 に各々の micro SD カードの評価結果をまとめた。起動が確認できた場合には○、起動しなかった場合には×を記している。Table 1 より明らかなように、照射量が 0.24 kGy までは殆どの micro SD カードは照射後も動作している。しかし、照射量がさらに増えると、3D-NAND, TLC, MLC と一つのトランジスタへのデータ格納量が多い素子、メモリセルを積層化した素子では OS が起動しなくなることが分かった。さらに照射量を増やして 72 kGy まで増加すると、殆どの素子で OS が起動できなくなった。唯一、SLC 方式の micro SD カードで OS 起動を確認した。これは、TLC<MLC<SLC の順でデータ読み書きの閾値が高くなっており、多少の電荷量変動でも格納したデータを保持できる。放射線が micro SD カードに照射されると、フラッシュメモリの絶縁膜を透過する際に充電された電荷を放出して、セル内の情報が消滅する。そのため、閾値の低い読み書き方式のメモリセルの情報が放射線照射により書き換わったと考

Table1. Operation of Raspberry Pi by various micro SD card after γ-ray irradiation. When the OS boot up/did not boot up, the circle/cross (o/x) described in the table.

	Radiation dose		
	0.24kGy	0.48kGy	0.72kGy
SLC	○	○	○
pSLC_A	○	○	×
pSLC_B	○	○	×
MLC	○	×	×
TLC	○	×	×
3DNAND_A	○	×	×
3DNAND_B	×	×	×

えられる。

2.2 データ転送速度の評価

Raspberry Pi と micro SD カードのデータ転送速度の評価を行った。Raspberry Pi 標準で導入されている転送速度診断プログラムにより、sequential write 速度を評価する。Figure 1 にガンマ線を 0.24 kGy 照射したときの、照射前後の micro SD カードの sequential write 速度を示す。読み書き方式ごとに、速度の差はあるが、照射前後の速度はほとんど変わらなかった。電界効果トランジスタに放射線が照射されると、電荷輸送のチャンネルに欠陥を導入し、それらがチャンネルの移動度を低下させる。このためデータ転送速度が遅くなると予想していたが、0.24 kGy 照射の段階では放射線照射の影響はほとんどなかった。さらに照射量が増加すると、速度が遅くなると予想されるが、OS 起動できないため、評価することができなかった。

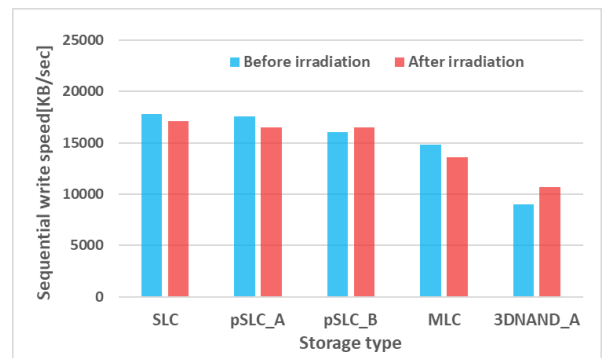


Figure 1. Sequential write speeds for micro SD cards before and after the 0.24 kGy γ-ray irradiation.

3. 結論

今回、各種半導体素子の放射線耐性強化を目的として、特に廃炉ロボット開発を見据えて、搭載するマイコンに組み込まれるメモリ素子の耐放射線性を評価した。Micro SD カードの構造並びに書き込み方式により放射線に対する耐性が異なることが分かった。特に、集積度を向上させた MLC, TLC 及び 3DNAND 方式のメモリは耐性が低く、読み書きの閾値が高い SLC 方式のメモリが高い放射線耐性を有することを確認した。素子への放射線入射に伴う電離効果によりフラッシュメモリ内の蓄積電荷放出のために、格納された情報が書き換わることが主な原因と考えられる。また、照射後に動作した micro SD のデータ転送速度を照射前の速度と比較したが、大きな変化は確認できなかった。今回の照射線量程度では、チャンネル部等への放射線照射導入欠陥の影響はほとんどないことが確認された。今後、耐性の高いメモリ素子を選定し開発に還元することを目指している。