

[2023206004]

## 放射線に起因する集積回路の一時故障と回路性能劣化の相関の測定

### Measurement of the Correlation between Radiation-Induced Temporal Failures and Circuit Performance Degradation

古田潤 <sup>A)</sup>, 小林和淑 <sup>B)</sup>,  
Jun Furuta <sup>A)</sup>, Kazutoshi Kobayashi <sup>B)</sup>  
<sup>A)</sup> Okayama Prefectural University  
<sup>B)</sup> Kyoto Institute of Technology

#### Abstract

We measured radiation effects in integrated circuits fabricated in a 65nm FDSOI process using gamma and heavy ion irradiation. One Mrad gamma ray decreased circuit speed by 20% and its performance degradation also affected the probability of radiation-induced temporal failures.

**Keyword:** Soft Error, Total Ionizing Dose Effect, FDSOI process

#### 1. はじめに

集積回路における放射線の影響は回路の信頼性を低下させる主要因である。特に放射線の多い宇宙環境での集積回路の利用するためには、放射線照射実験などを用いることで、放射線に対する集積回路の耐性を事前に評価する必要がある。放射線による誤動作の発生率や、放射線による回路性能の劣化を見積もり、射線に対する対策を十分に検討することが、宇宙開発において必須である。

集積回路における放射線の影響は主に 2 つに分類され、1 つは放射線が通過することで生じる回路の誤動作(ソフトエラー)であり、もう 1 つは多数の放射線が通過することで徐々に進行する回路性能の劣化現象(トータルドーズ効果)である。放射線が集積回路内部を通過すると、電荷を発生させるため、電氣的に保存されているデータが書き換わり、ソフトエラーが生じる。このソフトエラーを防ぐためには回路を複数用意して出力の多数決をとるなどの冗長化が利用される。また、FDSOI プロセスと呼ばれる絶縁層を半導体内部に挿入した構造も利用される。絶縁層の挿入により、放射線によって生じた電荷が集積回路に到達することを防ぐ方法である。FDSOI プロセスはソフトエラーに対して極めて効果的であるものの、トータルドーズ効果の影響を受けやすいことが知られている。

本研究では 65nm FDSOI プロセスで設計したテスト回路を用いてトータルドーズ効果による影響を評価し、トータルドーズ効果による回路性能劣化の有無がソフトエラー耐性に与える影響を評価した。ガンマ線照射実験を用いてトータルドーズ効果による劣化を生じさせ、重イオン照射実験によってソフトエラーの発生確率を評価した結果を報告する。

#### 2. FDSOI プロセスにおけるトータルドーズ効果の劣化量の測定

##### 2.1 測定回路

トータルドーズ効果は放射線が回路を通過するこ

とで回路内部の絶縁層が徐々に帯電し、回路性能を変化させる現象である。主な影響は消費電力の増加と、回路の動作速度の減少である。

トータルドーズ効果による回路性能の劣化を、65nm FDSOI プロセスで試作した回路にガンマ線を照射することで測定した。測定にはリングオシレータと呼ばれる発振回路を用いた。ガンマ線を照射し、リングオシレータの発振周波数の変化を測定することで、回路の遅延時間の変化を評価した。

##### 2.2 ガンマ線照射実験の測定環境

ガンマ線の照射実験は、高崎量子応用研究所のコバルト棟を利用して行った。トータルドーズ効果は絶縁層に電圧が印加されている場合に影響が大きいいため、リングオシレータに電圧を供給した状態で約 1Mrad までガンマ線を照射し、発振周波数を測定した。電圧や入力信号を供給するため、図 1 に示す電源と、15m のケーブルを利用した。

##### 2.3 測定結果

ガンマ線起因トータルドーズ効果による発振周波数の変化を図 2 に示す。リングオシレータの発振周波数 0.41GHz は照射したガンマ線によって徐々に小さくなり、1.5Mrad の照射によって約 0.33GHz となった。約 2 割周波数が減少しており、トータルドーズ

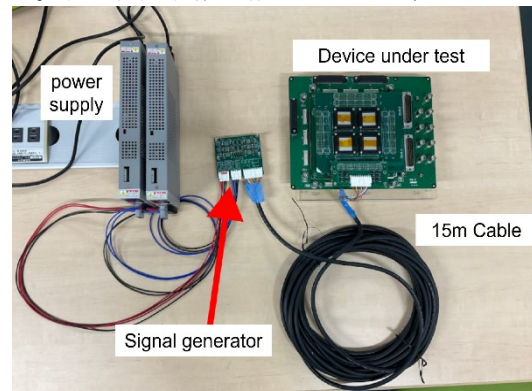


Figure 1. Measurement system.

[2023206004]

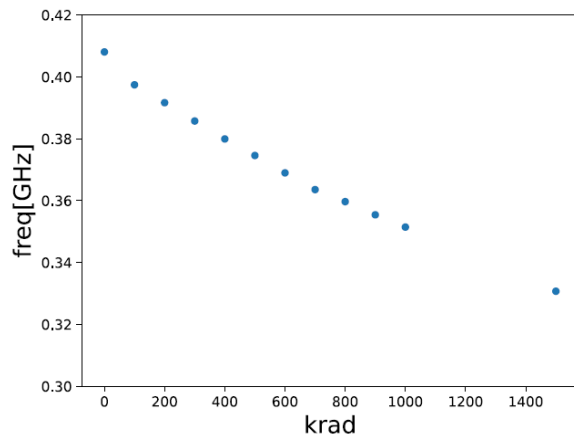


Figure 2. Frequency degradation by gamma-induced total ionizing dose effect

ズ効果によって回路の動作速度が 2 割減少することを確認した。回路の動作速度の減少は回路を構成するトランジスタのオン抵抗が上昇し、電流量が減少したことが原因である。

### 3. 重イオン照射実験によるソフトエラー率の評価

#### 3.1 測定回路

フリップフロップ(FF)と呼ばれる 1, 0 のデータを 1 つ保存できる記憶素子を 65nm FDSOI プロセスを用いて試作した。ソフトエラーは放射線の蓄積によって発生するトータルドーズ効果とは異なり、確率的に発生する現象であるため、3mm 角のチップ上に同一の構造の FF を数千個試作して測定した。また、FF の内部にローパスフィルタと呼ばれるノイズ除去回路を追加した耐放射線 FF である DFRFF も同様に同一のチップ上に試作した<sup>[1]</sup>。

試作したチップと、ガンマ線を事前に照射したことで劣化させたチップ、2 つの測定対象に対して重イオンを同時に照射し、ソフトエラー率の測定を行った。測定には JAXA 所有の真空チャンバーを利用し、重イオンの空気による減衰を除去した。照射角度はチップに対して垂直である。

#### 3.2 測定結果

FF におけるソフトエラー率を図 3 に示す。Q は保存しているデータを表し、CLK は入力信号を表す。縦軸の CS は衝突断面積を表し、値が大きいほどソフトエラー率が高いことを示す。

どの条件の測定結果でも、トータルドーズ効果によって回路が劣化した状態の方がソフトエラー率が高い結果となった。この原因はトータルドーズ効果によるトランジスタの出力電流の減少に起因する。電流量が減少すると、放射線の通過によって生じた電荷を打ち消す能力が減少し、発生した電荷による影響を受けやすくなる。そのため、ソフトエラー率

がトータルドーズ効果によって上昇している。

ソフトエラー率の上昇は通常の FF でも確認できるものの、その上昇量は平均して数割程度と小さい。一方で、耐放射線 FF である DFRFF ではソフトエラー率が大きく上昇した。その測定結果を図 4 に示す。トータルドーズ効果が生じていないチップではエラーが発生しなかったが、1000krad のガンマ線照射後では  $1 \times 10^{-11} \text{cm}^2/\text{bit}$  までエラー率が上昇している。ソフトエラー率が低いほどトータルドーズ効果による影響を受ける結果となった。

### 4. まとめ

本研究では放射線による劣化現象であるトータルドーズ効果によって回路が劣化した場合に、ソフトエラーの発生確率に与える影響を評価した。通常の記憶素子である FF ではトータルドーズ効果による影響は数割程度と小さいものの、放射線耐性を向上させた記憶素子である DFR FF ではトータルドーズ効果によるソフトエラー率の増加量は大きい。長期運用を想定する人工衛星などの用途の場合、ソフトエラー率の評価をトータルドーズ効果を想定する必要があることを確認した。

### 参考文献

- [1] M. Ebara, et al., "Evaluation of Soft-Error Tolerance by Neutrons and Heavy Ions on Flip Flops with Guard Gates in a 65 nm Thin BOX FDSOI Process", IEEE Trans. on Nuclear Science, vol.67, no. 7, pp. 1470 - 1477, 2020/06

