

耐ソフトウェアFF を用いた宇宙機用高信頼 FPGA の検討

A Highly-Reliable FPGA Using Radiation-Hard Flip-Flops for Spacecrafts

附田 悠人 丸岡 晴喜 古田 潤 小林 和淑
 Yuto Tsukita Haruki Maruoka Jun Furuta Kazutoshi Kobayashi
 京都工芸繊維大学
 Kyoto Institute of Technology

1. 研究背景

人工衛星などの宇宙機に搭載される回路にも FPGA (Field-Programmable Gate Array) が使用されている [1]。宇宙空間で使用される回路には高い信頼性が必要となる。ソフトウェアは放射線によって引き起こされる一時的な故障であり、宇宙空間での主な原因は重イオン線である。集積回路に放射線が衝突した際に保持している値が反転することで誤動作が起こる。FPGA 内のフリップフロップ (FF) や SRAM は放射線に弱いため、ソフトウェア対策が必須である。SRAM を原子スイッチ [2] に、FF を耐ソフトウェアFF に置換することにより再書き込み可能かつ宇宙空間でも高信頼の FPGA を提案する。本稿では、耐ソフトウェアFF である BCDMR-FF (Bistable Cross-coupled Dual Modular Redundancy FF) [3] の重イオンによるソフトウェア耐性の評価を述べる。

2. 評価方法

65nm FDSOI (Fully Depleted Silicon on Insulator) プロセスでリセット付き D-FF と BCDMR-FF を試作し、高崎量子応用研究所で重イオンによる宇宙空間でのソフトウェア耐性の実測評価を行った。測定条件を表 1 に示す。BCDMR-FF はラッチと C-element を二重化しており、それらのうち 1 つが反転しても元の値を保持する。D-FF と BCDMR-FF の回路図を図 1, 2 に、面積を表 2 に示す。

表1 測定条件

電源電圧	0.8 V
ビーム照射時間	30 s
核種	Ar : 17.5 MeV, Kr : 40.9 MeV
測定回数	各 20 回
Flux	Ar : 1.65×10^9 particle/cm ² Kr : 5.74×10^7 particle/cm ²

表 2 D-FF と BCDMR-FF の面積

FF	面積	面積比
D-FF	9.8 μm ²	1
BCDMR-FF	24.5 μm ²	2.25

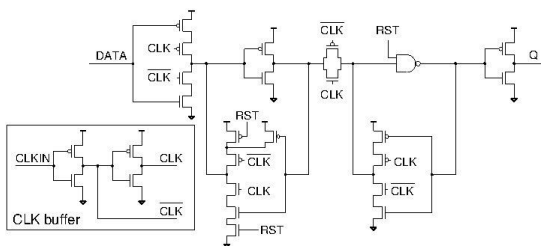


図1 リセット付きD-FF の回路図

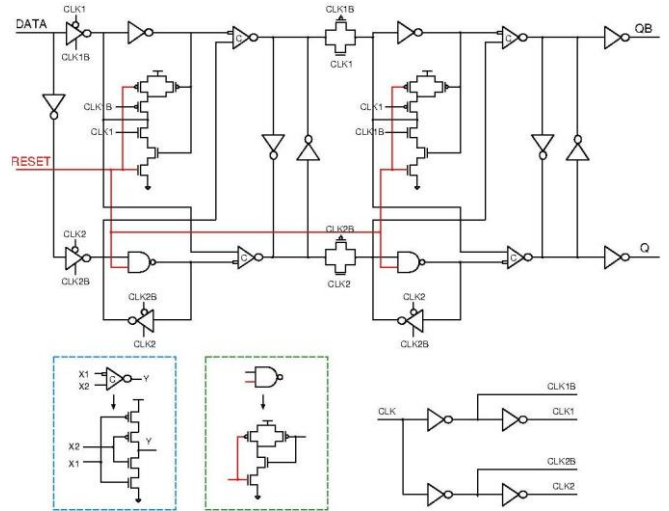


図 2 リセット付きBCDMR-FF の回路図

3. 評価結果

図3に測定結果を示す。BCDMR-FF では Ar, Kr のどちらにおいてもソフトウェアが発生しなかった。エラー数が 0 であるため、エラー率は信頼区間 68% で計算した。BCDMR-FF は D-FF と比べて Ar で 50 倍以上、Kr で 80 倍以上のソフトウェア耐性を持つ。

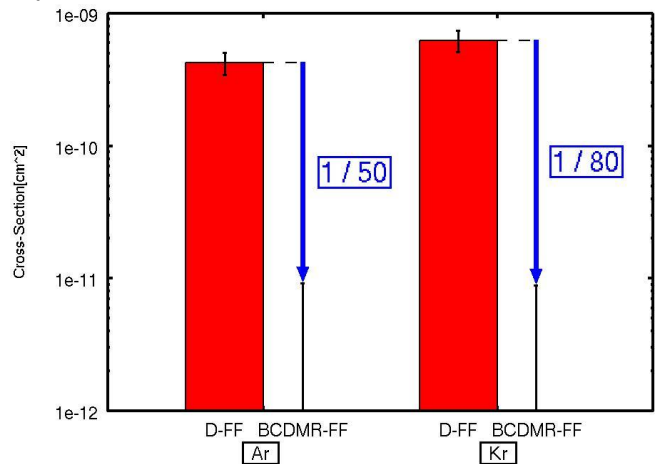


図 3 重イオン照射実験の測定結果

4. まとめ

BCDMR-FF は一般的な FF である D-FF と比べて面積オーバーヘッドが 2.25 倍となるが、Ar, Kr の照射ではソフトウェアが発生せず、Ar で 50 倍以上、Kr で 80 倍以上のソフトウェア耐性を持つ。宇宙機用 FPGA に搭載する FF として十分な信頼性を有する。

参考文献

- [1] C. Urbina-Ortega et al., RADECS, pp. 1-8, 2013.
- [2] M. Miyamura et al., COOL Chips, pp. 32-42, 2017.
- [3] J. Furuta et al., VLSI Cir. Sympo., pp. 123-124, 2010.