課題番号　2019A-C03
利用区分　成果公開（学術）

重イオン照射による耐放射線フリップフロップの評価

Evaluation of Radiation-hardened Flip-flops by Heavy Ion Irradiation

小林　和淑[1)]　　古田　潤[1)]

Kazutoshi KOBAYASHI　　Jun FURUTA

[1)]京都工芸繊維大学

（概要）

本研究では重イオンの照射実験を行うことで、集積回路の信頼性問題であるソフトエラーの発生率の評価を行った。ガードゲート構造を利用した提案フリップフロップと通常のフリップフロップを 65nm FDSOI プロセスにて設計・製造し、そのソフトエラー耐性の向上量を確認した。その結果、Ar イオンにおけるエラー率の向上量は約 10 倍であり、Kr イオンにおける向上量は約 3 倍であることを実測により示した。より高い LET 値を持つ Kr イオン時のソフトエラー耐性をより向上するためにはガードゲート構造の遅延時間をより大きくする必要があることを確認した。

キーワード：集積回路　信頼性　ソフトエラー　FDSOI プロセス

１．目的

集積回路の微細化・高性能化に伴いソフトエラーの発生率の増加が問題となっている。ソフトエラーとは放射線の電離作用によって生じる電荷が原因で生じる誤動作である。重イオンなどの放射線が多い宇宙空間で使用される探査機や人工衛星において避けられない問題であり、ソフトエラー対策は必須となっている。本研究ではソフトエラー耐性が高く、かつ回路性能の低下を数%に抑えた回路構造の提案を行うことを目的とする。そのために、提案回路を設計し、重イオン照射実験によってそのソフトエラー耐性の測定を行った。

図１に提案する耐ソフトエラーフリップフロップ構造（FRFF）を示す[1]。フリップフロップ（FF）は記憶素子の一種であり、1 または 0 の値を保持する回路である。この回路に放射線が衝突すると、保持値が反転してしまうため対策が必須である。提案回路ではガードゲート構造と呼ばれる図２の回路を基に構成されている。ガードゲート構造では C-element と呼ばれる論理ゲートと遅延素子で構成される[2]。C-element は 2 つの入力が異なるときのみ出力が変化する。そのため、放射線によって入力 IN が一時的に反転しても、遅延素子によってその到着がずれ、C-element の 2 つの入力が同時に放射線によって反転しない。そのため、出力は正しい値を保ち、放射線の影響を除去できる。このガードゲート構造の欠点としては回路動作として正しい入力の変化に対して出力の変化が遅延時間分遅れてしまうことである。よってガードゲート構造をそのまま図 3 の一般的な FF に適用すると、遅延素子分だけ回路性能が劣化する。図 1 に示した提案 FF では遅延時間の増加を改善するため、入力値を先に出力するように接続している。これにより遅延時間の増加を 8%に抑制している。

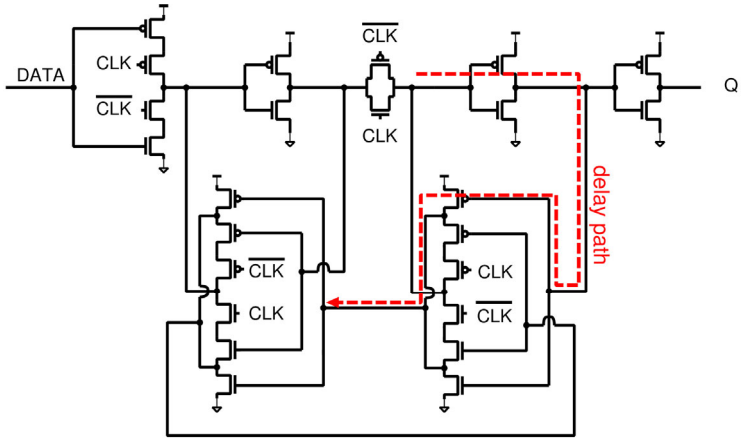


図１　提案するフリップフロップ、FRFF の構造。

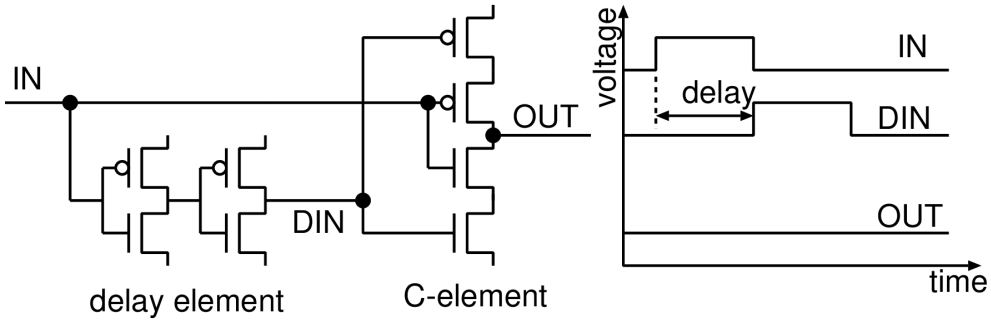


図2　ガードゲート構造。遅延素子の遅延時間以下のパルスは除去される

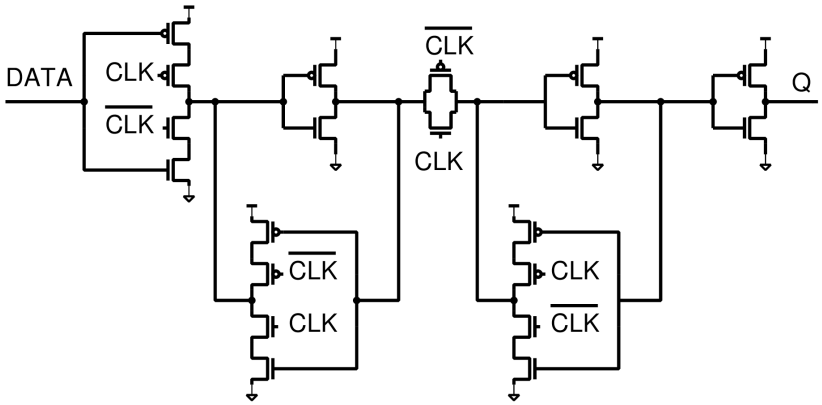


図3　一般的なフリップフロップの構造。

２．実施方法

図 1 に示した提案 FF と図 3 に示した通常の FF、そして比較のために遅延時間が 50%増加するものの、最も耐性が高くなる stacked FF を 65nm FDSOI プロセスにて設計・設計した。重イオン照射による加速試験の測定では提案 FF に重イオンを一定数照射し、照射後に FF が保持している値を読み出し、重イオンによって保持値の反転した個数を数えることでソフトエラー率を測定した。重イオン照射では AVF サイクロトロンのカクテル５を用いた。Kr イオンと Ar イオンの照射を行い、照射した粒子数はそれぞれ約 7 億個と 11 億個(ion/cm2)である。測定には JAXA 所有のシングルイベント耐性評価チャンバーを利用し、真空での測定を行った。

３．結果及び考察、今後の展開等

Ar イオンにおける Cross Section（エラー発生率に相当）の評価では、提案するフリップフロップは約 1/10 と減少し、放射線に対する耐性の向上効果を確認できた。一方で Ar イオンと比較して高い LET 値を持つ Kr イオンの測定結果では Cross Section の値が通常のフリップフロップと比較して約 1/3 となり、耐性の向上効果が小さくなる結果となった。LET の値が 15 MeV-cm2/mg から 40 MeV-cm2/mg に増えたことにより、Kr イオンではより長い一過性のパルスが生じやすくなる。そのため、Kr イオンによって生じた一過性のパルスを除去するのに十分な遅延時間を確保できていないことが原因と推測される。今後の展開として遅延時間を増加させた改良型提案フリップフロップを設計し、再測定を行う予定である。

４．引用(参照)文献等

[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”, RADECS, 2020
[2] A. Balasubramanian et. al., “Rhbd techniques for mitigating effects of single-event hits using guardgates.” IEEE Transactions on Nuclear Science, 52(6):2531-2535, 2005

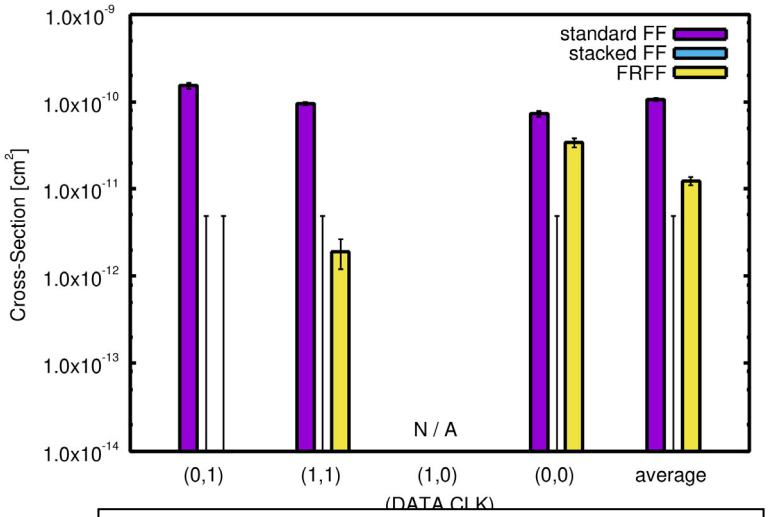


図 4　Ar イオンによるソフトエラー耐性評価結果。

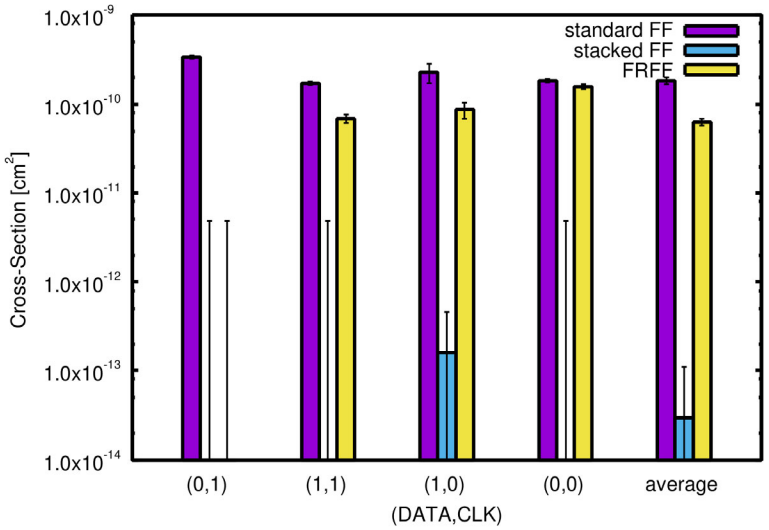


図 5　Kr イオンによるソフトエラー耐性評価結果。