

重イオン照射による最先端の SOI プロセスで試作された 低電力かつ耐放射線フリップフロップの評価

Evaluation of heavy-ion-induced soft error rates on low-power Flip Flop in advanced process

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ウェア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、FRFF 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、そのソフトウェア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耐性の向上量は約 100 倍であり、Kr イオンにおける向上量は約 10 倍であることを実測により示した。また、FRFF のソフトウェア耐性はガードゲート構造の遅延時間に依存することを実測により確認した。

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

集積回路を荷電イオンが通過すると、その電離作用によって予期せぬ場所に電荷が発生する。その結果、集積回路が保持するデータが反転し、一時的な誤動作 (ソフトウェア) の原因となる。本研究では集積回路における記憶素子の一種であるフリップフロップ (FF) の耐放射線構造の提案を行い、回路性能の低下を抑制しながら放射線耐性を向上させるのを目的とする。重イオン照射実験では、昨年度行った提案する FF に対する重イオン照射実験の結果を踏まえて放射線耐性を向上させる改良を加えた FF の測定を行う。改良により放射線耐性が向上することを確認する。

2. 実施方法

65nm FDSOI プロセスにて試作したチップに、JAXA 所有の真空チャンバーを利用して重イオンを照射することで FF のソフトウェア率を測定する。試作したチップには通常使用される FF の他に、我々が提案する FRFF、従来回路の耐放射線 FF などを集積しており、これらのソフトウェア率を比較することで提案する FRFF の有用性を確認する。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 5.22 億個/cm² と 5.22 億個/cm² である。FF には入力信号の DATA、制御信号である CLK、出力の Q の 3 つの端子があり、それぞれの端子は 0 (グラウンド電位) または 1 (電源電位) の値をとる。FF は CLK の値が 0 から 1 へ変化する時に DATA の値を保存し、保存した値を Q から出力する回路である。回路の入力値の状態の組み合わせとして、主に (DATA, CLK) = (0, 0), (1, 0), (0, 1), (1, 1) の 4 種類がある。これらの 4 入力状態それぞれにおいてソフトウェア耐性を測定した。

測定対象である FRFF について説明する。まず、2019 年に重イオン照射測定した FRFF の回路構造を図 1 に示す [1]。FRFF は図 2 のガードゲート構造 [2] を基にした回路である。ガードゲート構造は遅延素子と C-element で構成された構造であり、C-element の入力 2 つの信号ピンに同一の値が入力された場合に出力が変化する特性を利用した回路である。入力に放射線によるノイズ (反転) が発生しても、遅延素子によって C-element に到達する時間がずれる。そのため、C-element の出力は反転せず、放射線によるノイズが除

去される。FRFFはこのガードゲート構造をFF内部に組み込んだ構造である。FRFFでは回路の遅延時間を改善するために接続の工夫を行っている。C-elementの出力を用いるのではなく、一旦入力信号を出力する。その後、放射線によるノイズの場合ではその出力を訂正する構成とすることで、遅延時間の増加を抑制している。同時に元々FFを構成するのに使用していたインバータを再利用して遅延生成をしている。通常のFFと比べ最短経路は変化しないため遅延時間の増加は10%程度である。

2020年度の測定では、ガードゲート構造の遅延時間を増加した構造を65nm FDSOIプロセスにて試作を行った。設計した回路図の一例を図3に示す。図1ではセカンダリーラッチからプライマリーラッチのC-elementに返す値を、出力のインバータから返すように接続することで、ガードゲート構造にインバータ2段分の遅延時間を追加している。この改良型FRFFに重イオン照射実験を行うことで、Krイオン以上のLETでもソフトウェア耐性が高く保てることを2020年度の重イオン実験にて確認した。

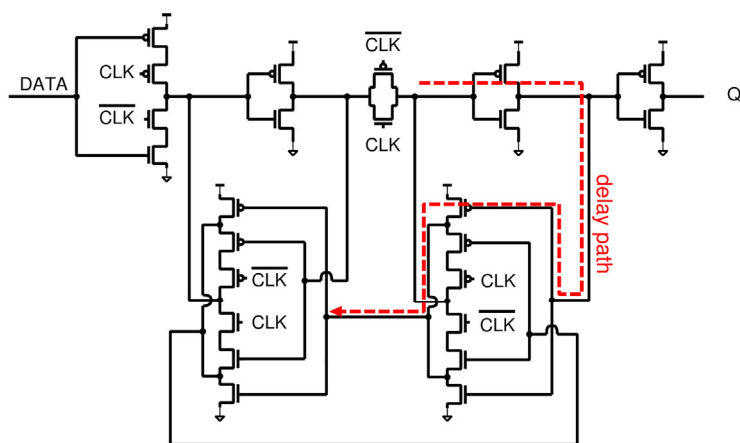


図1 提案するFRFFの構造(2019年度版)

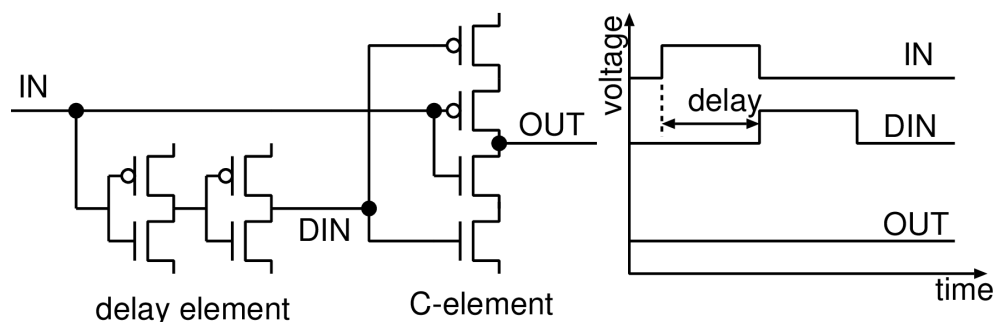


図2 ガードゲート構造。遅延とC-elementによりパルスを除去する。

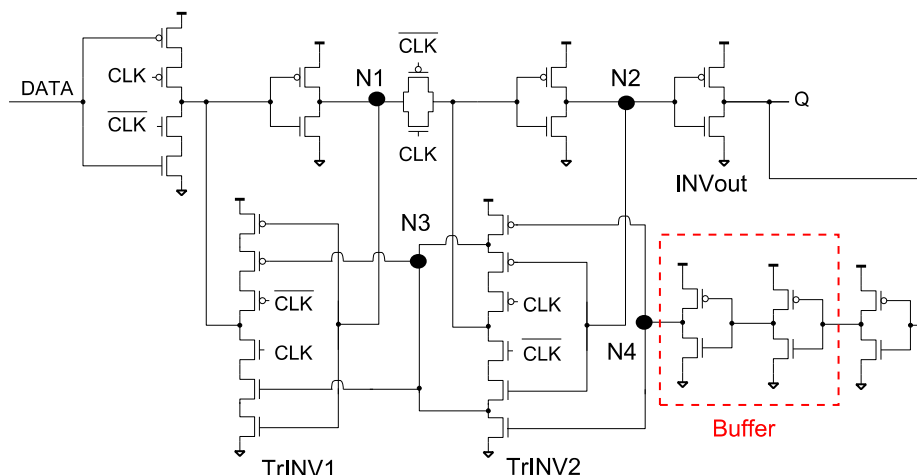


図3 遅延時間を増加させたFRFF。出力QからBuffer, TrINV2, TrINV1を通過して値を戻す構造にし、遅延時間を確保する構造。

3. 結果及び考察、今後の展開等

Ar イオンによるソフトエラー率の評価結果を図4に、Kr イオンによる評価結果を図5に示す。通常のFFと比較して、Ar イオンの結果ではFRFFは2桁程度の改善がみられ、Kr イオンでは1桁程度の改善となった。Ar イオンとKr イオンではLETに倍以上の差があるため、Kr イオンの方が生成する電荷量が多く、放射線によるノイズの影響が大きい。そのため、全てのノイズを除去するにはガードゲート構造の遅延時間が不十分であり、ソフトエラー率の低減効果が弱まったと推測される。昨年度の測定結果と比較しても遅延時間確保のためのバッファを挿入した今回のFRFFの方がソフトエラー率が低い結果となっており、遅延時間の確保がFRFFのソフトエラー耐性の向上において重要となることが判明した。

今後の予定として、コロナウイルスの影響により本年度では測定できなかった22nm FDSOIプロセスにて設計したFRFFの測定を予定している。重イオン照射を行い、微細化によって放射線耐性が減少しないことを実測にて確認する。

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., "Rbhd techniques for mitigating effects of single-event hits using guardgates." IEEE Transactions on Nuclear Science, 52(6):2531-2535, 2005

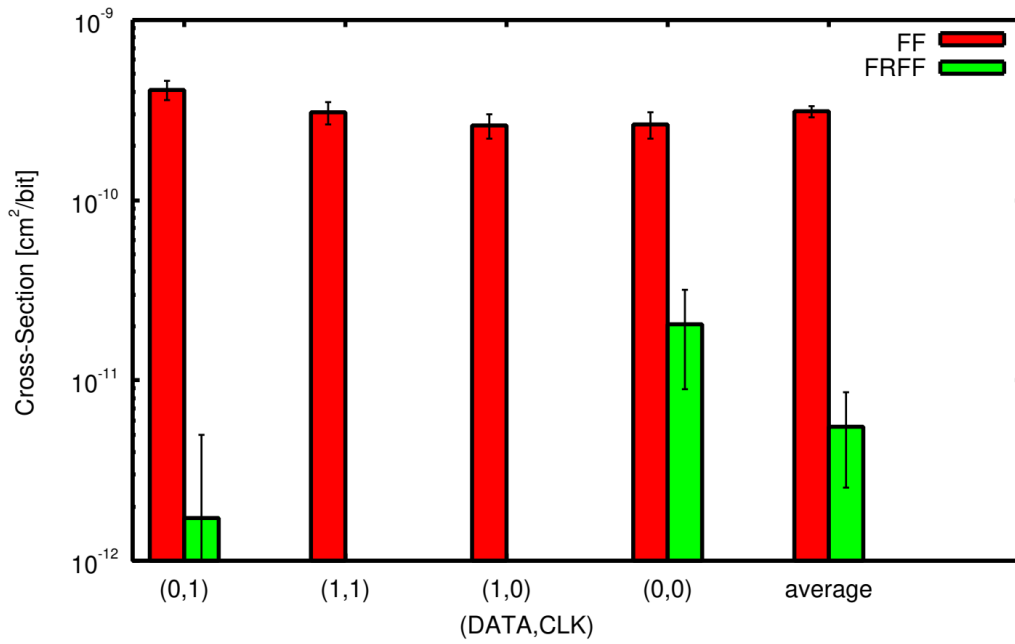


図4 Ar イオンによるソフトエラー発生率。平均して2桁程度の改善を確認。

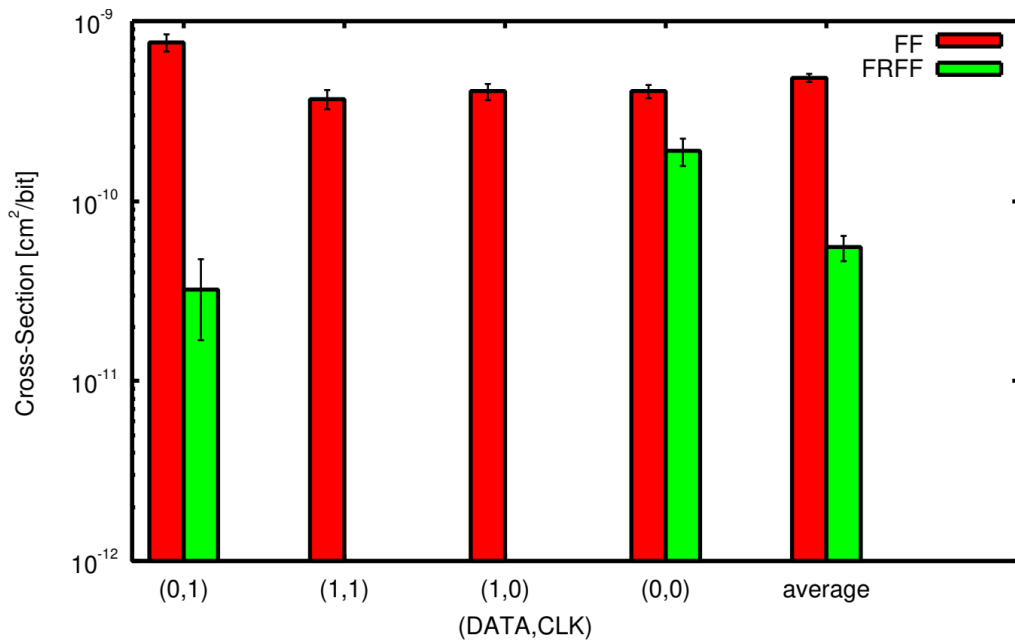


図5 Kr イオンによるソフトエラー発生率。平均して約1桁の改善を確認。