

# 22nm Bulk プロセスにおける面積遅延電力積を低減した3重化フリップフロップの構造の検討

Evaluation of Triple Modular Redundancy Flip-Flop Structures  
with Reduced Area Delay Power Product in a 22 nm Bulk Process

万代周平<sup>1</sup> 中島隆一<sup>1</sup>  
Shuhei Mandai Ryuichi Nakajima

京都工芸繊維大学<sup>1</sup>  
Kyoto Institute of Technology

古田潤<sup>2</sup> 小林和淑<sup>1</sup>  
Jun Furuta Kazutoshi Kobayashi

岡山県立大学<sup>2</sup>  
Okayama Prefectural University

## 1 はじめに

ソフトエラーとは、放射線がトランジスタに突入することによって電子正孔対が発生し、記憶素子の保持値や論理回路の出力値が反転する現象のことである。ソフトエラーの回路レベルでの対策の一つである多重化回路は、性能（面積・遅延時間・消費電力）のオーバーヘッドが大きい。微細化による集積度の向上とともに、複数箇所での同時反転のリスクが高まり、ソフトエラー耐性の低下が懸念される。

本稿では、多重化回路の一つである3重化フリップフロップ(TMRFF)の構造を複数パターンで比較し、性能のオーバーヘッドを抑えつつ、ソフトエラー耐性を維持できる構造を検討した。

## 2 評価対象回路

TMRFF[1] (図1) は、3つのFFから多数決を取る多重化回路である。今回の評価回路では、図2に示すソフトエラー対策を施していない標準FFを多重化に用いた。評価の基準には図1に示す無改良の構造のTMRFFを用いた。今回検討したTMRFFでは、多重化に用いる標準FFの終端のインバータを取り除くことで性能のオーバーヘッドを抑えた。そのうえで、表1の3項目を変化させ、8種類の構造を比較し、性能とソフトエラー耐性を両立できる構造を検討した。項目(1)のC-elementは、2つの入力値が異なるときは前状態を維持し、同じ時のみ出力が変化する素子である。これを3つ組み合わせることでVoterとして動作する。項目(2),(3)では、同時反転を防ぐためにラッチ同士の距離を離す構造を検討した。

表1 比較項目

項目	比較内容	
(1) Voter	AOI	C-element×3
(2) 中央の構造	タッセル	Voter
(3) FF1の向き	他のFFと同方向	左右反転

## 3 シミュレーション結果

22 nm bulk プロセスで2列分のスタンダードセルであるダブルハイトセルとして作成した場合の、性能および $Q_{crit}$ のシミュレーション結果を表2に示す。 $Q_{crit}$ とは、保持値の反転に必要な最小の電荷量のことであり、回路シミュレーションで対象ノードに電流源を接続することで求めた[2]。なお、 $Q_{crit}$ を面積・遅延時間・消費電

力の積(ADP積)で割った値をFoMとして比較した。無改良の構造と比較して、最良の構造では、消費電力は7%大きくなったが、面積は12%、遅延時間は13%小さくなり、 $Q_{crit}$ は0.5 fC程度大きくなった。

## 4 まとめ

本稿では、性能のオーバーヘッドを抑えつつ、ソフトエラー耐性を維持できる構造の検討を行った。今回検討した中で最良の構造は、無改良のものと比較して、面積と遅延時間を抑えられており、ソフトエラー耐性も高い。今後は、同時反転への耐性を含めた評価を実測により行う予定である。

## 参考文献

- [1] O. Ruano, et al., IEEE TNS, vol. 56, no. 4, pp. 2091-2102, 2009
- [2] P. Hazucha, et al., IEEE TNS, vol. 47, no. 6, pp. 2586-2594, 2000

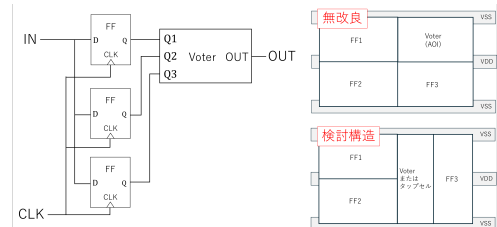


図1 TMRFF(左)とレイアウト構造(右)の概略

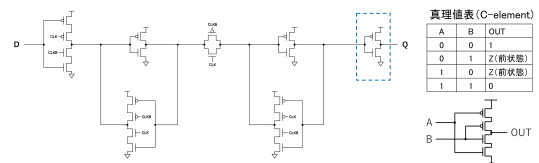


図2 左：標準FF（検討回路では青枠部分を取り除く）  
右：C-element

表2 シミュレーション結果（性能とFoMは無改良の構造の値で規格化、 $Q_{crit}$ は3つのFFでの平均値）

構造	面積	遅延時間	消費電力	$Q_{crit}$ [fC]	FoM
無改良	1.00	1.00	1.00	3.30	1.00
最良	0.88	0.87	1.07	3.83	1.41

\*最良の構造：

- (1) Voter：C-element×3
- (2) Voterを中央に置く
- (3) FF1を左右反転させる