

## 2. 2 ソフトエラー耐性の高いフリップフロップ Radiation-Hard Flip-Flops

小林和淑, 増田政基, 山本亮輔 (京都工芸繊維大学), 古田潤, 小野寺秀俊 (京都大学)

K. Kobayashi, M. Masuda, R. Yamamoto, Kyoto Institute of Tech.; J. Furuta, H. Onodera, Kyoto Univ.

### 1. はじめに

ソフトエラー耐性を高めるための多重化フリップフロップ(FF)の一つとして、二重化FFであるBCDMR FF, その低消費電力化を狙ったBCDMR-ACFFの回路構造を説明し、中性子を用いて行った実験結果についても報告する。

### 2. 研究の背景と目的

微細化, 低電圧化と共にLSIの信頼性は低下している。ソフトエラーは中性子,  $\alpha$ 線などによって引き起こされる一過性のエラーであり, SRAM やフリップフロップ(FF)などのメモリ素子の値を反転させ, LSIが誤動作する。FFでは, SEU\*による1ビット反転でもエラーとならない多重化が一般に用いられる。3個のFFと1個の多数決回路(Voter)を用いるTMR\*が用いられることが多いが, 回路および性能オーバーヘッドが大きい。我々の研究グループは三重化より面積が小さいBISER (Built-in Soft-Error Resiliency) FF<sup>1)</sup>を改良したBCDMR (Bistable Cross-coupled Dual Modular Redundancy) FFを提案している。BCDMRはBISERと比べて, クロック周波数でのエラー耐性を向上させている。その低電力化を狙ったBCDMR ACFF (ACはAdaptive Coupling)も提案した。

### 3. ソフトエラー耐性の高いFF

図1に, BCDMR FFとBCDMR ACFFの回路図を示す。BCDMRは, BISERと異なり二重化したラッチの値が異なる競合状態で, 出力がHiZとなるC-elementを二重化している。BISERではこのC-element起因から発生するSETパルス\*により二重化したスレーブラッチが共に反転するため, クロック周波数とともにエラー率が上昇する。一方BCDMRでは二重化されたC-elementによりその直後に接続されているKeeperの保持値を相補的に固定するため, 最悪の場合でもスレーブラッチの一方しか反転しない。BCDMR ACFFではBCDMRに, AC素子<sup>2)</sup>を組み込んだ。単相のクロックで動作するため, 活性化率が小さいところで消費電力が低くなる。

### 4. 実験結果

65nmバルクCMOSプロセスにて試作したBISER FF,

BCDMR FFの中性子による加速試験を行った。結果を図2に示す。BISER FFは予想通り, クロック周波数に対してエラー数が増加したが, BCDMR FFは増加していない<sup>3)</sup>。通常のFFのエラー数は260個であり, エラーの観測されなかったBCDMRは通常のFFより大幅なエラー耐性を持つといえる。BCDMR ACFFは低活性化率10%以下で通常のFFと同程度の電力となる。そのエラー耐性はBCDMR FFとほぼ同等であり, 改良したレイアウトにおいては中性子測定ではエラー数0となった。<sup>4)</sup>

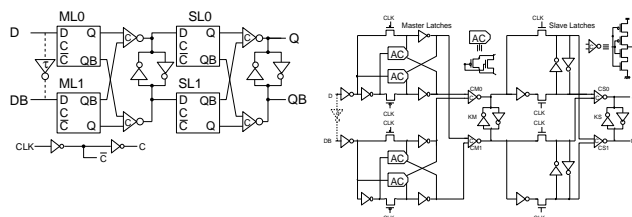


図1 BCDMR FF(左)とBCDMR ACFF(右)の構造

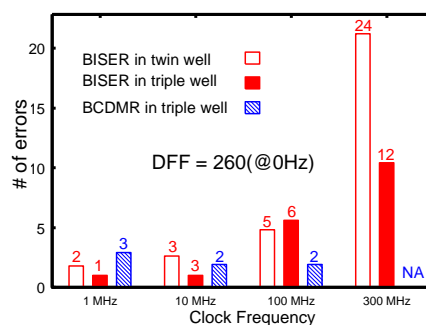


図2 中性子照射実験の結果

### 5. 結論

本稿では, 二重化+ $\alpha$ の面積オーバーヘッドで高いエラー耐性を有するBCDMR FFおよびその低電力版であるBCDMR ACFFのエラー耐性と電力を論じた。BCDMR FFは通常のFFと比べてエラー数を260個から0個へ大幅改善する。BCDMR ACFFは, 低電力かつそのエラー耐性も高い。

### 参考文献

- 1) S. Mitra et al., IFIP, pp. 332-337(2006.10).
- 2) K. T. Chen et al., ISSCC, pp. 338-340(2011.2).
- 3) R. Yamamoto et al., IEEE Trans. on Nucl. Sci., vol.58, no.6, pp. 3053-9(2011.12)
- 4) M. Masuda et al., IEEE Trans. on Nucl. Sci., vol.60, no.4, pp. 2750-2755(2013.8)