

氏名	カジマリュウイ 中島 隆一
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博 1 2 0 9 号
学位授与の日付	令和 8 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 電子システム工学専攻
学位論文題目	用途に応じた耐放射線性回路設計と医療用炭素線を用いた中性子起因ソフトエラー評価手法
審査委員	(主査) 教授 小林 和淑 教授 高井 伸和 准教授 新谷 道広 ルネサスエレクトロニクス シニアスペシャリスト 熊代 成孝 岡山県立大学准教授 古田 潤

## 論文内容の要旨

本論文は、社会インフラの中核を担う半導体集積回路において、微細化に伴い深刻な信頼性上の課題となっている放射線起因の一時故障「ソフトエラー」に対し、使用環境と製造プロセスに適合した最適な耐性回路設計指針を確立し、かつ評価の大きな障壁となっている照射試験環境の制約を克服する新たな評価手法を構築した成果をまとめたものである。現代社会において、半導体集積回路の信頼性は生命や社会基盤の安全に直結している。しかし、デバイスの微細化は動作電圧の低下に伴う保持電荷量の減少を招き、地上から宇宙に至るまで様々な環境でソフトエラーを顕在化させている。ここで重要なのは、対策としての「耐性回路設計」と、その効果を検証するための「評価手法」が、いずれも大きな実用的課題に直面している点である。回路設計においては、環境ごとの放射線粒子の特性を無視した一律の多重化対策が、面積や電力の過大なオーバーヘッド、すなわち「過剰設計」を招いている。一方で評価手法においては、地上ソフトエラーの主因である中性子に対する耐性を検証するための専用照射施設が世界的に極めて少なく、開発者が耐性評価を迅速に行える環境にないことが、高信頼性デバイスの普及を妨げる大きな要因となっている。本研究は、この「設計の最適化」と「評価の可用性向上」という、不可分な二つの課題に対し、過剰設計を排した環境・プロセス最適化型のフリップフロップ (FF) 回路を提案・試作し、実測によってその有効性を実証するとともに、世界的に施設が不足している白色中性子源に代わる新たな評価手法として、がん治療等に用いられる医療用炭素線照射施設の活用を提案・確立している。

第 2 章の地上環境向けの研究では、主なエラー要因である中性子およびパッケージ材料由来のアルファ線に対し、冗長化手法に頼らず、回路トポロジーの工夫によって脆弱なノードの臨界電荷量 ( $Q_{crit}$ ) を向上させる設計手法を提案した。65nm バルクプロセスを用い、ゲートの寄生容量を効果的に活用した PLTGFF および、パストランジスタとリーク電流抑制機構を組み合わせた FBTIFF を設計・試作した。特に FBTIFF においては、保持特性を維持しつつ待機電力を極小化

する設計を施した結果、標準的な FF と比較して静的電力を大幅に増加させることなく、ソフトウェア率を実測値で 58%低減することに成功した。これにより、従来の多重化回路 (DICEFF) ほどの大きな面積を許容できない地上向け製品において、信頼性とコストの最適なトレードオフを実現できることを示した。

第 3 章の宇宙環境向けの研究においては、高 LET (線エネルギー付与) 重イオンが支配的な環境下で、FD-SOI プロセス特有の寄生バイポーラ効果が引き起こす長パルスのシングルイベントトランジェント (SET) への対策を推進した。22nm および 65nm FD-SOI プロセスでガードゲート (GG) 構造を使った既存の耐ソフトウェア FF を設計し、重イオン照射により GG 遅延と耐性の関係を調査した。実測評価の結果、22 nm で設計した DFRFFLD は標準回路に対し 1800 倍という極めて高い耐性を実証した。一方で、65 nm プロセスでは、GG 遅延とソフトウェア耐性の関係を明らかにした。得られた関係を基に、回路性能のオーバーヘッドと耐性の両立を追求し、RSR (Reduce Sensitive Range) 構造とパストランジスタベースの GG を統合した IRPSFF を新たに開発した。実測の結果、IRPSFF は面積や電力の増加を最小限に抑えつつ、強靱なソフトウェア耐性を有する Stacked FF に匹敵する重イオン耐性を達成したことを確認した。

第 4 章では、地上ソフトウェア評価における最大の障壁となっている「中性子照射試験の実施困難性」を解消するため、医療用炭素線を用いた中性子起因ソフトウェア評価手法を構築した。国内外の白色中性子源施設は極めて限定されており、開発サイクルの遅延を招いている現状に対し、本研究では普及が進む医療用炭素線照射施設を中性子源として転用する手法を考案した。具体的には、加速された炭素線をアクリルターゲットに照射し、核破砕反応によって発生する二次中性子を利用するものである。PHITS シミュレーションを用いた核輸送計算と実測を組み合わせることにより、混在する不要な荷電粒子を厚さ 8cm の鉛ブロックで遮蔽し、地上環境のエネルギー分布に類似した高純度な中性子照射環境を構築する条件を特定した。この手法を群馬大学重粒子線医学センター (GHMC) において実証し、標準的な白色中性子源である大阪大学核物理研究センター (RCNP) での測定結果と比較したところ、ソフトウェア率において相関係数 0.98 と両者は概ね一致した。これは、医療用炭素線照射施設が既存の白色中性子源の代替手法となり得ることを世界で初めて学術的に実証した成果であり、今後のデバイス開発における評価コストと期間の大幅な削減に寄与するものである。

以上の研究成果により、冗長化に頼らない用途に応じたソフトウェア対策手法および可用性の高い評価手法を明らかにし、高信頼性集積回路の実践的開発指針を示した。提案された設計指針は高信頼性 LSI の効率的な実装を可能にし、炭素線を用いた評価手法は開発現場における耐性評価のハードルを下げるものである。本研究の成果は、地上から宇宙まで、次世代社会を支えるあらゆる半導体集積回路の信頼性を担保する上で、重要な貢献を果たすものと考えられる。

## 論文審査の結果の要旨

本学位論文は、半導体の微細化に伴い深刻化する「ソフトウェア」に対し、環境ごとの最適な耐性回路設計と、試験環境の制約を克服する新評価手法を確立したものである。設計面では、過

剰な多重化を排した手法を提案した。地上用には 65nm プロセスで静的電力を抑制しつつエラー率を 58%低減する回路を、宇宙用には FD-SOI プロセスを用い、重イオンに対し最小限のオーバーヘッドで高耐性を実現する回路をそれぞれ開発・実証した。評価面では、不足する中性子源の代替として、医療用炭素線施設を利用する手法を構築した。二次中性子を用いた本手法は、標準的な施設での測定結果と相関係数 0.98 で一致し、その有効性を世界で初めて実証した。以上の成果は、高信頼性 LSI の設計最適化と評価の可用性向上を同時に実現し、開発コスト削減と期間短縮に大きく寄与するものである。

本論文は上記の通りソフトエラーに強靱な回路と医療用炭素線を用いた中性子源での評価方法を新規提案評価しており、高く評価できる。

本論文は、査読を経た以下の 2 編の原著論文（うち 1 編は申請者が筆頭著者）を基礎として構成されており、さらに申請者が筆頭著者である 1 編の原著論文を参考論文としている。

#### 基礎論文

- 1) Ryuichi Nakajima, Shotaro Sugitani, Haruto Sugisaki, Takafumi Ito, Shuhei Mandai, Jun Furuta, Kazutoshi Kobayashi, Makoto Sakai, “A Measurement Method for Neutron-Induced Soft-Error Rates in Terrestrial Applications Using a Clinical Carbon Beam,” IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 72, no. 10, pp. 3235-3246, October 2025, doi: 10.1109/TNS.2025.3611382.
- 2) Shotaro SUGITANI, Ryuichi NAKAJIMA, Keita YOSHIDA, Jun FURUTA, Kazutoshi KOBAYASHI, “Radiation-Hardened Flip-Flops in a 65 nm Bulk Process for Terrestrial Applications Coping with Radiation Hardness and Performance Overheads,” IEICE Transactions on Electronics, vol. E108.C, no. 2, pp. 115-126, February 2025, doi: 10.1587/transele.2024ECP5016.

#### 参考論文

Ryuichi NAKAJIMA, Takafumi ITO, Shotaro SUGITANI, Tomoya KII, Mitsunori EBARA, Jun FURUTA, Kazutoshi KOBAYASHI, Mathieu LOUVAT, Francois JACQUET, Jean-Christophe ELOY, Olivier MONTFORT, Lionel JURE, Vincent HUARD, “Soft-Error Tolerance by Guard-Gate Structures on Flip-Flops in 22 and 65 nm FD-SOI Technologies,” IEICE Transactions on Electronics, vol. E107.C, no. 7, pp. 191-200, July 2024, doi: 10.1587/transele.2023CDP0004.