

(続紙 1)

京都大学	博士（情報学）	氏名	竹内 浩造
論文題目	A study on heavy ion-induced single event effects for radiation-tolerant FPGA development (耐放射線性FPGAに向けた重粒子誘起シングレイベント効果の研究)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、耐放射線性フィールドプログラマブルゲートアレイ (FPGA) の実現に向けて、重粒子誘起シングレイベント効果の課題に取り組んでいる。宇宙用途に有望な原子スイッチベースFPGAの実用化には、原子スイッチが、宇宙用半導体デバイスに求められる重粒子の線エネルギー付与 (LET) に耐えることを確認する必要がある。FPGAに搭載される静的ランダムアクセスメモリ (SRAM) について、エラー訂正符号やスクラビング技術の実装に必要な重粒子放射線への応答を事前評価する必要がある、評価方法の効率化が求められている。 第1章は、本論文の背景と目的を示している。宇宙放射線環境について説明し、トランジスタとその放射線効果を述べている。原子スイッチFPGAの主要コンポーネントである原子スイッチとSRAMが説明されている。最後に、本論文の目的と全体的構成が示されている。 第2章では、原子スイッチのシングレイベントアップセット (SEU) 耐性が調査されている。原子スイッチを用いて実装されているルックアップテーブル、マルチプレクサ、およびクロスバマトリックスが重粒子に対して耐性があることを示すため、重粒子照射実験を実施した。原子スイッチに接続しているCMOS回路で発生するシングレイベントトランジェント (SET) についても、パルスレーザ照射によって調査した。SETの緩和に有用な方法を考案し、回路シミュレーションとテクノロジー支援設計 (TCAD) シミュレーションにより有効性が提示されている。 第3章では、重粒子照射下でのバルクFinFET SRAMのSEU断面積が調査されている。FinFETは宇宙でも利用が期待されており、FinFET SRAMビットセルの重粒子応答に対する理解が求められている。6トランジスタ SRAMに対して、さまざまなデータパターンと電源電圧下で重粒子照射を実施した。シングレイビットアップセット (SBU) およびマルチセルアップセット (MCU) の故障ビットマップの分類により、特定のLET条件下でのFinFET SRAMビットセルの有感領域を推定した。故障ビット解析は、SBUおよびMCUの根底にあるメカニズムを議論するための重要な手がかりであり、電荷収集メカニズムの推定に活用した。 第4章では、FinFET SRAMのSEU断面積の電圧依存性が評価されている。低LET条件下でFinFET SRAMのSEU断面積が、既存モデルの電源電圧依存性で表現できないことを明らかにした。FinFET SRAMの臨界電荷と収集電荷の関係を理解するため、TCADシミュレーションを実施した。既存モデルで表現できないSEU断面積の電源電圧依存性は、プレーナ型トランジスタでは観察されておらず、FinFET独自の構造と電荷収集方法によることが示唆された。 第5章では、FinFET SRAMのSEU断面積モデルが提案されている。特定の電圧条件下でのLETの関数としてのSRAMのSEU断面積は、Weibull関数、累積対数正規関数、または指数関数のいずれかに回帰し分析されることが多い。Weibull関数へのSEU断面積の回帰はさまざまな世代の多くのSRAMで利用されてきたが、物理的な背景はない。本章で			

提案したモデルは、物理的に説明可能なパラメータを用いて、LETと電源電圧の両方の依存性を予測する。提案モデルは、既存のsilicon-on-insulator (SOI) SRAM向けのモデルを拡張して導出されており、プレーナ型トランジスタにも適用できる。提案モデルを用いることで、少ない放射線粒子と動作条件に対するSEU断面積の測定により、低コストで広範な条件でのソフトエラー率評価が可能となる。

最後に、第6章では本論文の結論を述べるとともに研究の展望を提示している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、放射線照射実験およびシミュレーションに基づいた研究を通じて、FPGAにおけるプログラミング用原子スイッチおよびSRAMの重粒子誘起シングレイベント効果(SEE)に関する実験結果と分析を提示している。得られた主要な成果は以下の通りである。

1. 高LET重粒子に対して、原子スイッチがプログラミング状態によらず状態変化を起こさず、高い放射線耐性を持つことを実験的に示した。原子スイッチをロックアップテーブル、マルチプレクサ、配線クロスバーに利用することで、プログラミング構成情報が重粒子に対して耐性を持つようにできるため、原子スイッチが高信頼性FPGAの実現に適していることを示した。また、予期せぬ長いSETが原子スイッチのセット/リセットトランジスタで発生することを、パルスレーザ照射により明らかにした。セット/リセットトランジスタからのSETを緩和する技術を提案し、効果をTCADシミュレーションで確認した。
2. 重粒子照射下で16nm FinFET SRAMに発生したSBUとMCUを分類し、反応断面積および故障ビットマップを分析した。フィンを共有し同じウェルにあるオフ状態の隣接トランジスタが、データパターンに依存して強いMCU感度を示すことを明らかにした。
3. 低LET条件下でFinFET SRAMのSEU断面積の電圧依存性を調査した結果、電圧依存性を予測する従来の回帰方程式がFinFET SRAMに適さないことを明らかにした。そこで、FinFETおよびプレーナ型トランジスタ SRAMの両方に適用可能な、物理パラメータに基づくSEU断面積-LET-電源電圧曲線モデルを提案した。提案モデルの妥当性は、いくつかの電源電圧に対する重粒子照射実験結果を用いて確認している。提案モデルは、アルファ粒子放射で得たSEU断面積-電源電圧データ、あるいは特定の電源電圧条件で測定されたSEU断面積-LETデータを用いて校正することで、LETと電源電圧の依存性を再現することができる。これにより、SEU断面積の測定を容易化し、ソフトウェアレート評価を低コストで行うことができるようになる。

以上のように、本論文は重粒子が飛び交う宇宙環境で利用するFPGAの開発において、プログラミング素子である原子スイッチの放射線耐性評価を行うとともに、データ格納用FinFET SRAMの重粒子応答を実験的に評価・解析し、多様な粒子や電圧条件を表現できるSEU断面積モデルを提案するなど、宇宙用途向け集積回路設計に対する学術上・実用上の寄与が認められる。よって、本論文は博士(情報学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年8月1日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、(令和8年9月30日までの間)当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。