

# Study of Muon-induced Single Event Upsets in SRAMs and their Fundamental Physical Process

真鍋, 征也

<https://hdl.handle.net/2324/4475179>

---

出版情報 : Kyushu University, 2020, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 真鍋 征也

Name

論文名 : Study of Muon-induced Single Event Upsets in SRAMs and their  
Fundamental Physical Process

Title (SRAM 素子におけるミューオン起因シングルイベントアップセットとその素過程物理現象に関する研究)

区 分 : 甲

Category

## 論文内容の要旨

## Thesis Summary

今日および将来の高度情報化社会は高性能・多機能な電子機器により支えられ、その電子機器を構成する半導体デバイスは我々の社会インフラの1つである。我々は電子機器の信頼性に依存しており、機器の性能向上に加えて、安心・安全の観点から信頼性の確保が重要となる。電子機器の主たる信頼性問題として、近年ソフトエラーと呼ばれる電子機器上での一過性の誤動作・故障現象が注目を集めている。地上におけるソフトエラーの主要因は、宇宙から降り注ぐ放射線(宇宙線)である。半導体素子に入射した宇宙線はデバイスとの相互作用により電荷を付与する。付与された電荷の一部は記憶ドレインに収集され、収集電荷量がある閾値(臨界電荷量)を超えた時、保持データが反転(Single Event Upset: SEU)し、ソフトエラーが発生する。

従来、ソフトエラーの主要因は核反応経路で多くの電荷を付与する中性子と見なされてきたが、近年その新たな要因としてミューオンと呼ばれる素粒子が注目を集めている。ミューオンは地上における宇宙線荷電粒子の約70%(強度は $1/\text{cm}^2/\text{sec}$ で中性子の約3倍)を占めるが、半導体素子に対する付与電荷量が小さいため発生要因と見なされていなかった。しかしながら、半導体デバイスの微細化・省電力化に伴う臨界電荷量が低下から、その影響が懸念され2010年以降多くの研究が報告されている。実験研究ではSRAMデバイスに対して正電荷を有するミューオン(以下、正ミューオン)の照射が行われ、ミューオン自身の電離作用によるSEUの発生が確認され、またSRAMの微細化による発生確率の増加が確認された。一方、シミュレーション研究では、負電荷を有するミューオン(以下、負ミューオン)特有の原子核捕獲反応(以下、捕獲反応)と呼ばれる原子核反応による影響が指摘された。本反応から放出される荷電粒子はミューオンそれ自身に比べて高い電離作用を有しており、多くの電荷をデバイスに付与する。これらの荷電粒子の影響によって負ミューオンは正ミューオンに比べ、ソフトエラーの発生に高い影響を持つと先行シミュレーションで指摘された。しかしながら、これまで負ミューオン起因SEUの実験データは乏しく、ミューオン起因ソフトエラー評価における大きな問題であった。これらを踏まえ本研究では、ミューオンがソフトエラー発生に及ぼす影響を実験・シミュレーションを基に解明し、さらにミューオン起因ソフトエラー予測の高度化に向けその素過程である捕獲反応の理解を深めることを目的とした。

本研究ではまず、茨城県東海村にあるJ-PARC MUSE施設において65-nm設計ルールSRAM素子に対する正・負ミューオンの照射を行い、SEU発生断面積を実測した。正ミューオンは自身の電離作用のみでSEUを発生させるため、測定された正と負ミューオン起因SEU断面積を比較することにより捕獲反応の影響を観察することが可能となる。比較により先行研究で予想された捕獲反応から放出される荷電粒子の影響を実証した。さらに三次元粒子輸送モンテカルロシミュレーションコードPHITSと単純有感領域(SV)モデルを用いたシミュレーション(以下、PHITS-SVモデル)による実験データの解析を行なった。PHITS-SVモデルのパラメ

ータ調整により実験で観察された正負ミューオン誘起 SEU 断面積を概ね再現でき、解析により放出荷電粒子の中でも H, He イオンをはじめとする軽荷電粒子の放出が SEU 発生に最も影響を与える本質的な素過程であると見出した。さらに、PHITS-SV モデルを用いて地上放射線環境におけるミューオン起因 SEU 発生率を計算した。その結果地上における影響を議論する上でも捕獲反応が重要であることを明らかにした。

これらの実験及びシミュレーションの結果を受け、捕獲反応から放出される軽荷電粒子のうち H イオンの放出エネルギースペクトルデータの取得を行なった。大阪大学 RCNP MuSIC にて  $\Delta E$ -E 法を用い、これまで測定データのあった陽子・重陽子に関しては低エネルギー側へデータを拡張し、三重陽子のデータを初めて取得した。さらに PHITS に実装されている 2 種類のモデル計算(QMD/GEM と MQMD/GEM)と比較し、特に高エネルギー側におけるモデル計算の過小評価を見出した。さらにモデルの選択が SEU 計算に及ぼす影響についても検討した。

本論文は以下の 5 章から構成されている。

第 1 章では研究背景と目的について述べている。まず、ソフトウェア問題の現状と動向について言及した。その後ミューオン起因ソフトウェアに関する先行研究を提示し、ソフトウェア問題の動向を踏まえた上でミューオン (特に負ミューオン) に着目した理由を述べた。さらに、本章以降の議論で重要となる地上環境における宇宙線、ミューオンの基本的な性質と物質との相互作用、負ミューオン原子核捕獲反応について説明している。

第 2 章では 65-nm 設計ルール UTBB-SOI SRAM に対する正・負ミューオン起因 SEU 断面積の測定について述べている。実験は J-PARC MUSE 施設で行い、生成された正・負ミューオンを SRAM 素子に照射し、測定した。また、ミューオンの運動エネルギー(5.3 ~ 8.6 MeV)や SRAM の動作電圧(0.25 ~ 1.1 V)を変更し、系統的なデータを取得した。その後、得られた実験データの解析とその結果を詳細に述べている。まず、断面積の入射ミューオン運動エネルギー依存性と動作電圧依存性について議論し、負ミューオン捕獲反応が SEU 発生に及ぼす高い影響を実験的に示した。次に、本測定結果と先行正ミューオン照射試験および負ミューオンのシミュレーション研究を比較し、傾向が定性的に一致していることを確認し、本測定の妥当性を示した。さらに同設計ルールの bulk SRAM に対する正・負ミューオン照射試験結果と比較し、デバイスの構造による SEU 発生機構の違いについて議論した。

第 3 章では PHITS-SV モデルを用いたシミュレーションによる実験結果の解析と地上環境における SEU 発生率の推定について述べている。まず、シミュレーションで用いた体系及び手法について説明した。次に PHITS-SV で計算した平均 SEU 断面積の入射運動エネルギー依存性と実験値を比較し、本手法の実験再現性を確認した。また、SEU 発生に寄与する粒子の割合を計算し、ミューオンが SRAM の有感領域に停止する入射運動エネルギーでは、捕獲反応から放出される軽荷電粒子(H, He イオン)がその主たる要因であることを明らかにした。さらに、PHITS-SV モデルで地上環境における SEU 発生率を導出し、地上放射線環境でも捕獲反応の影響が大きいことを示した。導出した SEU 発生率を中性子の場合と比較し、65-nm 設計ルールの SRAM ではミューオンの影響は十分小さいことを明らかにした。一方で建屋におけるミューオンの輸送計算を行い、中性子及びミューオン強度の建屋による減衰の違いから 5 階建のコンクリート建屋 1 階においては中性子に対するミューオンの寄与が 10%程度まで上昇することを見出した。

第 4 章ではシリコンにおける負ミューオン捕獲反応から放出される H イオンのエネルギースペクトル測定について述べている。まず、4 章までに述べた結果と筆者が所属する研究グループがこれまで行った研究の成果から捕獲反応放出荷電粒子のスペクトルを測定する意義を説明した。これまで報告のある測定データを提示し、今回新たに取得するデータについて述べている。その後本研究で行った大阪大学 RCNP MuSIC における実験セットアップについて説明し、得られた実験データの解析とその結果について議論した。本実験で得られた測定結果を先行実験データと比較し、本結果の妥当性を示した。次に、測定されたデータを PHITS コードに実装されている 2 種類のモデル計算(QMD/GEM と MQMD/GEM)と比較した。MQMD を用いた計算では QMD の場合と比べ、重陽子や三重陽子の複合粒子の放出率が大きくなり、実験データの再現性が向上することがわかった。しかしながら、特に高エネルギー側においては実験データを過小評価しており、更なる改良の必要性が示唆された。さらに MQMD を用いた SEU 計算を実施し、モデルの選択が SEU 計算に及ぼす影響を議論した。

第 5 章では本論文の総括を行うと共に、ミューオン起因ソフトウェア研究における今後の展望を述べた。