OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	An Experimental Study on Terrestrial Radiation-Induced Single Event Upsets in Planar and FinFET SRAMs
Author(s)	黒木, 貴志
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/82290
rights	© 2021 IEEE. Reprinted, with permission, from T. Kato et al., "Muon-Induced Single-Event Upsets in 20-nm SRAMs: Comparative Characterization With Neutrons and Alpha Particles," in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 68, no. 7, pp. 1436-1444, July 2021.
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 （ 黒木 貴志 ）	
論文題名	An Experimental Study on Terrestrial Radiation-Induced Single Event Upsets in Planar and FinFET SRAMs （Planar型およびFinFET型SRAMにおける地上放射線起因シングルイベントアップセットに関する実験的研究）

論文内容の要旨

In the terrestrial environment, all semiconductor devices are continuously exposed to terrestrial radiations originating from cosmic-rays and natural radioisotopes. A problem is that the terrestrial radiations deposit charge on the semiconductor devices through ionization and can cause transient errors, so-called soft errors.

The growing integration of semiconductor devices, such as system-on-a-chips, has increased the susceptibility to the terrestrial radiations and has made the soft error problem more challenging. At the same time, the soft error phenomena have become complex due to the aggressive scaling of transistors. Among the semiconductor devices, static random access memories (SRAMs) are one of the most susceptible devices to the terrestrial radiations. This is because the SRAM devices have been highly integrated, and because the size and voltage scaling of SRAM cells has drastically decreased the amount of stored charge. Therefore, the appropriate understanding of the terrestrial radiation-induced soft errors in the SRAM devices is necessary to cope with soft error issues in advanced semiconductor devices.

This thesis focuses on single-event upsets (SEUs) and multiple-cell upsets (MCUs) induced by the terrestrial radiations in advanced SRAMs, with the aim of understanding the impact of the technology advancement on the SEU and MCU responses. For the advanced SRAMs, this thesis deals with both planar and fin-shaped field effect transistor (FinFET) technologies. For the terrestrial radiations, the major sources of the SEUs have been considered to be high-energy neutrons, thermal neutrons, and alpha particles. In addition to these particles, negative and positive muons have recently received great attention as potential sources of the SEUs. This thesis covers all these particles. The SEU and MCU responses of the planar and FinFET SRAMs are extensively studied by a variety of experimental methods. In particular, particle irradiation testing is performed for all the above particles. Moreover, an emerging laser irradiation technique is utilized to explore the underlying mechanism.

The studies in this thesis address the effects of size scaling, critical charge reduction, and transistor geometry change, which are the key factors in the technology advancement of SRAMs. The studies begin with the exploration of MCU mechanisms complicated by the size scaling. Single-pulse laser irradiations unveil a novel mechanism, named multi-well coupled potential unbalancing. The size scaling also affects the angular sensitivity of high-energy neutron-induced SEUs and MCUs. High-energy neutron irradiations at several incidence angles reveal the significant angular dependence of SEU and MCU responses in 20-nm planar SRAMs. This angular sensitivity is also studied in 12-nm FinFET SRAMs. The comparative analyses between the planar and FinFET SRAMs demonstrate the difference in the angular sensitivities due to the transistor geometry change. The final study investigates muon-induced SEUs and MCUs, which can be significant due to the critical charge reduction. The unique SEU and MCU characteristics are clarified in the 20-nm planar SRAMs through negative and positive muon irradiations with comparison to other terrestrial radiations.

This thesis provides interesting and insightful findings through the studies based on various irradiation experiments and deepens the understanding of the terrestrial radiation-induced SEUs in advanced SRAMs. The findings are meaningful not only for understanding SEU phenomena, but also for developing effective mitigation techniques. On the basis of the obtained findings, some suggestions are offered for SEU mitigation. Therefore, the results yielded in this thesis will be helpful for resolving soft error problems and for achieving radiation tolerance in current and future semiconductor devices.

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　黒木　貴志　）		
	（職）	氏　　名
論文審査担当者		
主 査	教授	橋本　昌宜
副 査	教授	三浦　典之
副 査	教授	小林　和淑（京都工芸繊維大学 電気電子工学系）
副 査	准教授	中川　博之

論文審査の結果の要旨

本論文は、微細化が進むSRAM（static random access memory）の信頼性が環境放射線により低下する問題であるSEU（single-event upset）の解決に向け、地上環境におけるその現象の理解、および対策方法の提案に取り組んだものである。本論文では、Planar型およびFinFET型SRAMについて実験的に研究を行い、以下の成果を得ている。

［新しいメカニズムの理解］MCU（multiple-cell upset）メカニズムの解明
MCUは、複数のSRAMセルに同時にエラーが生じるタイプのSEUであり、適切な対策のためにはそのメカニズム・特徴を理解する必要がある。本研究では、パルスレーザー照射実験により、放射線により複数セルに電荷が付与された状況において、特異なエラーパターンのMCUが引き起こされることを見出した。さらに、この特異性は、MWCPU（multi-well coupled potential unbalancing）と呼ぶ、SRAMを構成する2つのpウェルの電位変動の大小関係により、内部ノードの状態が決定されるメカニズムに起因することを明らかにした。

［高エネルギー中性子入射方向の影響の理解］Planar型およびFinFET型SRAMにおける入射角度依存性の解明
地上環境の高エネルギー中性子は、地面に対し垂直に降り注ぐ成分が多く、SRAMの設置方向によって相対的に入射方向が変化する。本研究では、入射角度を変えながら行った高エネルギー中性子照射実験により、SRAMのワード線と平行に入射する場合、MCUの中でも訂正が困難なタイプのMBU（multiple-bit upset）の発生が増加することを明らかにした。同時に、ワード線が地面と垂直になることを避けて設置することにより、エラー訂正機構の効率低下を回避できることを提案した。さらに、Planar型SRAMにおけるMCUのエラーパターンの特徴から、斜め入射におけるMWCPUの寄与を明らかにした。また、MCUの電圧依存性について、Planar型SRAMとは異なり、FinFET型SRAMでは入射角度に依存することを見出した。この差異は、FinFET型SRAMにおいて、電荷収集メカニズムである寄生バイポーラ効果の寄与が入射角度により変化することが原因であることを示した。

［ミュオンが引き起こすSEUの特徴の理解］地上環境の他の放射線が引き起こすSEUとの差異の解明
SRAMの微細化に伴い、地上環境においてミュオン起因SEUが増加する可能性がある。本研究では、主要な地上放射線の照射実験により、負ミュオンによるMCU発生割合の電圧依存性について、高エネルギー中性子に類似して増加傾向であり、減少傾向を示す熱中性子およびアルファ粒子とは異なることを明らかにした。また、負ミュオンによるMCUのエラーパターンの発生傾向について、高エネルギー中性子とも熱中性子とも異なること見出した。これらの比較から、負ミュオンについて、それ特有の捕獲反応がMCUの特徴を決定することを示した。

以上の研究成果は、微細化したPlanar型およびFinFET型SRAMにおいて、地上環境放射線が引き起こすSEUのメカニズム・特徴を明らかにするものであるとともに、これらを考慮して適切なSEU耐性評価および対策の実施を可能にするものである。これらのことから、本論文は、微細化が進むSRAMの信頼性向上に大きく貢献するものであると期待できる。よって、博士(情報科学)の学位論文として価値のあるものと認める。