

1X01 様々な中性子源に適用可能な地上環境ソフトウェア率評価手法

○安部晋一郎 (原子力機構), 橋本昌宜 (京都大学), 廖望 (東京大学), 加藤貴志 (ソシオネクスト), 浅井弘彰 (HIREC), 新保健一 (日立製作所), 松山英也 (ソシオネクスト), 佐藤達彦 (原子力機構), 小林和淑 (京都工芸繊維大学), 渡辺幸信 (九州大学)

Terrestrial SER Estimation Method using One-Time Neutron Irradiation Testing Applicable to Various Kinds of Neutron Sources

Shin-ichiro Abe (JAEA), Masanori Hashimoto (Kyoto University), Wang Liao (University of Tokyo), Takashi Kato (Socionext Inc.), Hiroaki Asai (HIREC), Kenichi Shimbo (Hitachi Ltd.), Hideya Matsuyama (Socionext Inc.), Tatsuhiko Sato (JAEA), Kazutoshi Kobayashi (Kyoto Institute of Technology) and Yukinobu Watanabe (Kyushu University)

Key Words: Monte Carlo Simulation, Neutron Radiation Effects, PHITS, Single Event Upsets (SEUs), Soft Errors

Abstract

We have proposed a method to estimate the terrestrial soft error rates (SERs) based on simulation coupled with one-time neutron irradiation testing which can be applied to various kinds of neutron sources. The validity of our method has been investigated for 65-nm bulk SRAMs with the measured data using various neutron sources.

1. 研究背景および目的

半導体デバイスへの放射線影響の 1 つとして、メモリ素子の保持情報が反転する現象 (シングルイベントアップセット, SEU) があり、これによって電子機器が一時的な誤動作 (ソフトウェア) を起こす。半導体デバイスの微細化・高集積化に伴い、ソフトウェアの発生率 (Soft Error Rate, SER) は増加しており、地上環境においても高信頼性が要求される電子機器において深刻な問題となる。地上環境では一次宇宙線と大気との核反応によって生じる二次宇宙線が降り注いでおり、これらのうち中性子がソフトウェアの主因であることが知られている。半導体デバイスの信頼性を保証するためには、SER 評価が肝要となる。地上環境での SER を評価する手法としては、地上環境の中性子エネルギー分布を再現する中性子源を用いて測定する方法が一般的である[1]。しかし、そのような中性子源は世界に数か所程度しかなく、高まる地上環境 SER 評価の需要に対してマシンタイム不足が問題となっている。文献[1]に記載されている別の地上環境 SER 評価手法としては、単色または準単色の中性子 (あるいは陽子) を照射して SEU 断面積を測定し、複数の測定値を Weibull 関数でフィッティングすることで、SEU 断面積の中性子エネルギー

依存性を導出し、それに基づいて地上環境 SER を算定する方法がある。しかし Weibull 関数は 4 つの可変パラメータを有するため、少なくとも 4 つの異なる入射エネルギーに関する SEU 断面積の測定値が必要となり、文献[1]では、1~14 MeV、50~60 MeV、90~100 MeV、200 MeV 以上の 4 つのエネルギー領域に関する測定値の取得が推奨されている。

このような状況において、もし 1 つの測定値で地上環境の SER を評価でき、また地上環境の中性子のエネルギー分布とは異なる様々な中性子源で取得した測定値を地上環境 SER 評価に利用可能となれば、マシンタイム不足の解消や地上環境 SER 評価のコスト削減に役立つ。そこで我々は、1 つの測定値と放射線挙動解析コードによるシミュレーションを活用した、新たな地上環境 SER 評価手法を開発した[2]。本発表では、開発した評価手法の概要を説明するとともに、その妥当性や有用性を検証した結果等について報告する。

2. 地上環境 SER 評価手法

本提案手法では、放射線挙動解析コードを用いて半導体デバイスを搭載した試験ボードへの中性子照射シミュレーションを、中性子エネルギー E_n を変えながら繰り返し行い、半導体デバイスの記憶ノード

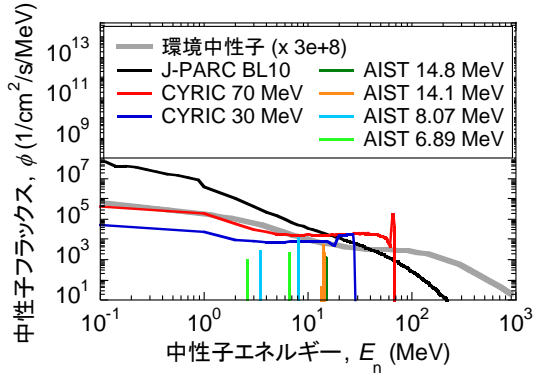


図1 SEU測定実験を実施したAIST、CYRICおよびJ-PARC BL10の中性子エネルギー分布。環境中性子のエネルギー分布はPARMA 4.0 [9]による計算値

への収集電荷量が $q \sim dq$ となるイベント数 $N(E_n, q) dq$ を算定する。このとき、SEUが起こる収集電荷量(しきい電荷量)が Q_{fit} の半導体デバイスのSEU断面積は次式で算出される。

$$\sigma_{SEU}(E_n, Q_{fit}) = \frac{S}{N_{in} \times N_{bit}} \int_{Q_{fit}}^{\infty} N(E_n, q) dq \quad (1)$$

ここで、 S は試験ボードに対する中性子の照射面積、 N_{in} は入射中性子数、 N_{bit} は半導体デバイス中のメモリビット数である。

Q_{fit} は、素子の設計ルールやデバイスパラメータ、回路のレイアウトなど様々な要因に依存し、シミュレーションで絶対値を算定することは困難であるため、本提案手法では可変パラメータとして扱い、任意の中性子源で測定したSEU数 $N_{SEU,exp}$ と、シミュレーションで得たSEU断面積を用いて次式で算定されるSEU数 $N_{SEU,calc}$ が合致する Q_{fit} を採用する。

$$N_{SEU,calc}(Q_{fit}) = t N_{bit} \int \phi(E_n) \sigma_{SEU}(E_n, Q_{fit}) dE_n \quad (2)$$

ここで、 t は測定の際の中性子照射時間、 $\phi(E_n)$ は測定を実施した中性子源のエネルギー分布である。

Q_{fit} が決定した後、地上環境SERは次式で算定される。

$$SER_{GND} = \int \phi_{GND}(E_n) \sigma_{SEU}(E_n, Q_{fit}) dE_n \quad (3)$$

ここで、 $\phi_{GND}(E_n)$ は環境中性子のエネルギー分布である。

なお、1つの測定値から地上環境SERを評価する別の簡易的な方法として、SEU断面積を次式のようにステップ関数で近似する方法が挙げられる。

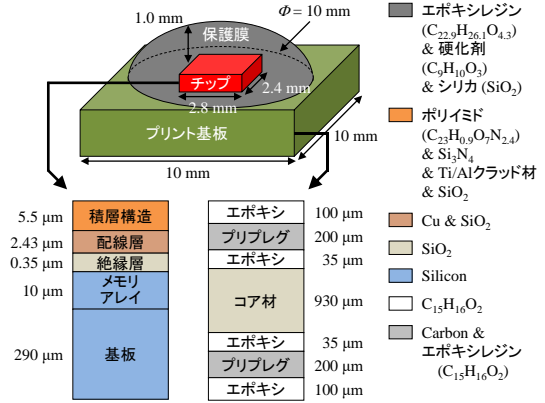


図2 シミュレーションで用いた試験ボードの計算体系

$$\sigma_{step}(E_n) = \begin{cases} 0 & (E_n < E_{cut}) \\ \frac{N_{SEU,exp}}{t N_{bit} \int_{E_{cut}}^{\infty} \phi(E) dE} & (E_n \geq E_{cut}) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 E_{cut} はSEU断面積のカットオフエネルギー、である。

我々はこれまでに、産業技術総合研究所(AIST)、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター(CYRIC)、J-PARCにて、それぞれ単色・準単色・連続エネルギーの中性子を設計ルール65nmのBulk SRAMに照射してSEU率を測定し、SEU率の中性子照射方向依存性や動作電圧依存性などを明らかにしてきた[3-5]。図1に測定を行った加速器施設の中性子エネルギー分布を、環境中性子のエネルギー分布とともに示す。本研究では、提案する評価手法の妥当性を検証するために各測定値を用いて地上環境SERを算出するとともに、Weibull関数法およびステップ関数法で算定した地上環境SERとの比較を行った。なお、過去の研究[6]で $E_n = 6$ MeVでSEU断面積が急激に増加することが判明していたため、本研究ではステップ関数法について $E_{cut} = 6$ MeVと設定した。

図2にシミュレーションで用いた試験ボードの計算体系を示す。放射線挙動解析コードとしてはParticle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) [7]を用い、保護膜側およびプリント基板側からの中性子照射シミュレーションを実施した。記憶ノードへの収集電荷量の計算には多重有感領域(Multiple Sensitive Volume, MSV)モデル[8]を採用し、地上環境SERの算定で用いる環境中性子のエネルギー分布はPHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere (PARMA) 4.0 [9]を採用した。

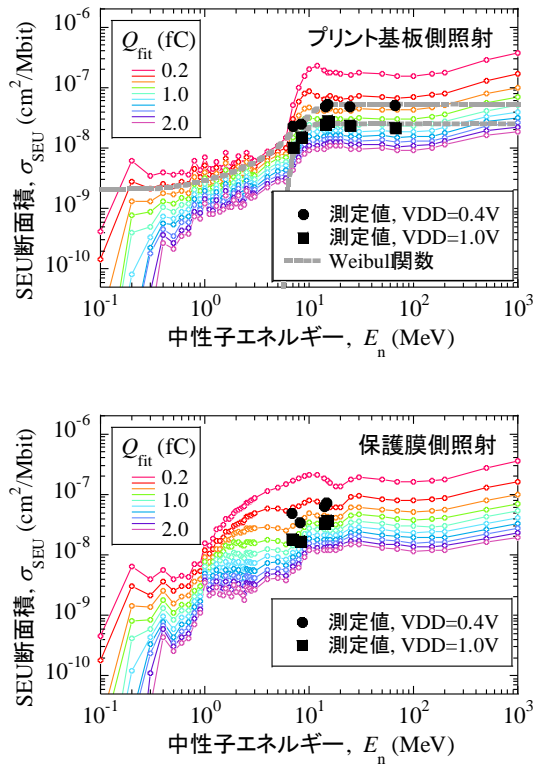


図3 プリント基板側および保護膜側からの中性子照射シミュレーションで算定した各 Q_{fit} に関する SEU 断面積。測定値は文献[5]から引用

3. 結果および議論

はじめに、図3に試験ボードの保護膜側およびプリント基板からの中性子照射シミュレーションで得た SEU 断面積を、デバイスの動作電圧 (VDD) を 0.4 V および 1.0 V として得た測定値と共に示す。プリント基板側照射に関しては測定値が十分にあったため、Weibull 関数を用いたフィッティング結果も示す。なお、測定の際に照射した中性子は完全な単色エネルギーではないため補正が必要となる。本研究では、各測定で得られた $N_{\text{SEU,exp}}$ に対するピークエネルギー周辺の中性子の寄与割合 a を PHITS シミュレーションで推定し、次式で SEU 断面積を算定した。

$$\sigma_{\text{SEU,exp}} = \frac{aN_{\text{SEU,exp}}}{tN_{\text{bit}} \int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \phi(E_n) dE_n} \quad (5)$$

ここで、 E_{min} および E_{max} は各中性子源のエネルギー分布におけるピーク部の最小値および最大値である。

次に、図4に各測定値とシミュレーション値との比較より決定した Q_{fit} を用いて式(3)で算定した地上環境 SER と、Weibull 関数法およびステップ関数法で算定した地上環境 SER の比較を示す。ステップ関数

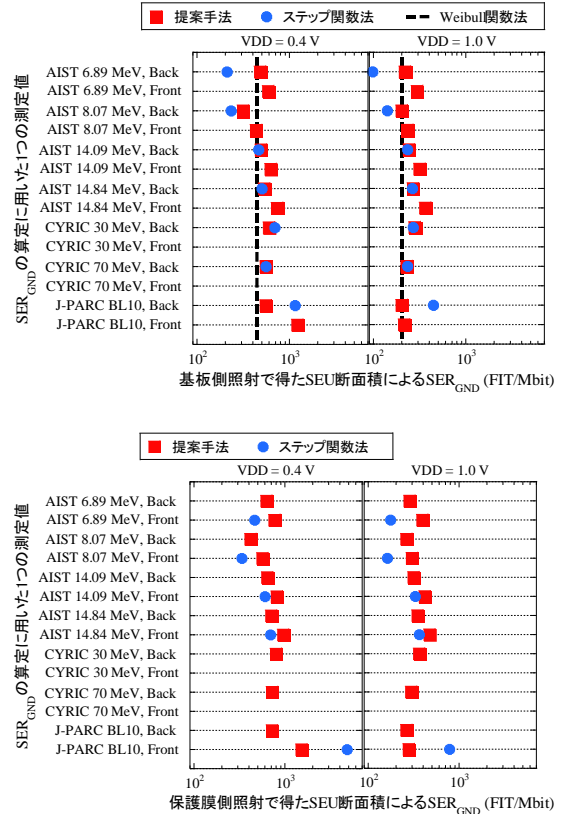


図4 各測定値を用いて本提案手法およびステップ関数法で算定した地上環境 SER。上図はプリント基板側照射、下図は保護膜側照射で得た SEU 断面積を用いた結果であり、各図の左図は VDD = 0.4 V、右図は VDD = 1.0 V に関する結果。上図については、Weibull 関数法で得た地上環境 SER もプロット

法で算定した地上環境 SER のうち、AIST 14.1 MeV、AIST 14.8 MeV、CYIRIC 30 MeV および CYIRIC 70 MeV の測定値を用いて評価したものは Weibull 関数法で算定した地上環境 SER と 50%以内の一致を示したが、AIST 6.89 MeV、AIST 8.07 MeV の測定値を用いて評価したものは大幅に低い値を示した。これは、図3に示すように、高エネルギー領域のおおよそ飽和している SEU 断面積と比較して数 MeV 以下の低エネルギー領域の SEU 断面積が低いことに起因する。また J-PARC BL10 の測定値を用いて評価したものは大幅に高い値を示した。これは、実際には J-PARC BL10 の中性子ビームに豊富に含まれる低エネルギー中性子が引き起こした SEU を、ステップ関数法では高エネルギー中性子が引き起こしたと誤認してしまうためである。一方、本提案手法で算定した地上環境 SER は評価に用いる測定値に依らず同程度の値を示した。地上環境 SER の最小値と最大値の比は、VDD = 1.0 V ではステップ関数法は 4.8 であるのに対して

本提案手法は 1.8、VDD = 0.4 V ではステップ関数法は 14.2 であるのに対して本提案手法は 3.9 である。

なお、図 3 に示したように、SEU 断面積は中性子エネルギーが数百 keV を下回ると急激に減少するため、あまりにも低エネルギーの中性子源は地上環境 SER 評価には適用できない。このような低エネルギー領域で生じる SEU は、中性子の弾性散乱が原因であることが過去の研究で明らかにされている[10]。弾性散乱によって質量数 A の反跳原子核が得る最大エネルギー E_{\max} は

$$E_{\max} = E_n \frac{4A}{(A+1)^2} \quad (6)$$

で、反跳原子核による付与電荷量がしきい電荷量以上でなければ SEU は起き得ないため、中性子入射によって SEU が起きるか否かのしきいエネルギー $E_{n,th}$ は、少なくとも次式の関係を満たす必要がある。

$$E_{n,th} \geq \frac{Q_{fit}}{e} E_{pair} \frac{(A+1)^2}{4A} \quad (7)$$

ここで、 e は素電荷量、 E_{pair} は電子正孔対を 1 つ生成するために要する平均エネルギー（シリコンの場合は 3.6 eV）である。例えば、反跳原子核がシリコンで $Q_{fit} = 1.0$ fC の場合、 $E_{n,th} \geq 170$ keV と、図 3 の SEU 断面積の形状と整合する。以上のように、本提案手法で地上環境 SER を評価する際も、測定値は数百 keV 以上の中性子源で取得する必要がある。

4. まとめ

本研究では、シミュレーションと 1 つの測定値から地上環境 SER を評価する手法を新たに考案した。設計ルール 65 nm の Bulk SRAM に関する様々な測定値を用いて提案手法の妥当性と有用性を検証した結果、本提案手法は測定値を取得する中性子源のエネルギー分布によらず、安定した評価結果が得られることを定量的に明らかにした。また、1 つの測定値から地上環境 SER を評価する別の手法として、ステップ関数法についても検証を行った。その結果、低エネルギー中性子を含む中性子源は評価に利用できないものの、ピークエネルギーが十数 MeV にある中性子源を用いることで、妥当な評価結果が得られることもわかった。一方で、数百 keV 以下の中性子源では SEU が起こり得ないため、地上環境 SER 評価には適用できないことも判明した。

参考文献

[1] Measurement and Reporting of Alpha Particle and

Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices, JEDEC Standard JESD89B, 2021.

- [2] S. Abe, M. Hashimoto, W. Liao, T. Kato, H. Asai, K. Shimbo, et al, "A Terrestrial SER Estimation Methodology based on Simulation coupled with One-Time Neutron Irradiation Testing," IEEE Trans. Nucl. Sci., Early Access, DOI: 10.1109/TNS.2023.3280190.
- [3] J. Kuroda, S. Manabe, Y. Watanabe, K. Ito, W. Liao, M. Hashimoto, et al., "Measurement of Single-Event Upsets in 65-nm SRAMs Under Irradiation of Spallation Neutrons at J-PARC MLF," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 67, pp. 1599–1605, Mar. 2020.
- [4] S. Abe, W. Liao, S. Manabe, T. Sato, M. Hashimoto, and Y. Watanabe, "Impact of Irradiation Side on neutron-Induced Single-Event Upsets in 65-nm Bulk SRAMs," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 66, pp. 1374–1380, Feb. 2019.
- [5] W. Liao, K. Ito, S. Abe, Y. Mitsuyama, and M. Hashimoto, "Characterizing Energetic Dependence of Low-Energy Neutron-Induced SEU and MCU and Its Influence on Estimation of Terrestrial SER in 65-nm Bulk SRAM," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 68, pp. 1228–1234, May 2021.
- [6] S. Abe, T. Sato, J. Kuroda, S. Manabe, Y. Watanabe, W. Liao, et al., "Impact of Hydrided and Non-Hydrided Materials Near Transistors on Neutron-Induced Single Event Upsets," in Proc. IEEE Int. Rel. Phys. Symp. (IRPS), Apr. 2020, pp. 8C.5.1-8C.5.7.
- [7] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe et al., "Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02," J. Nucl. Sci. Technol., vol. 55, pp. 684–690, Jan. 2018.
- [8] S. Abe, and T. Sato, "Soft error rate analysis based on multiple sensitive volume model using PHITS," J. Nucl. Sci. Technol., vol. 53, pp. 451–458, Mar. 2016.
- [9] T. Sato, "Analytical model for estimating terrestrial cosmic ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world: Extension of PARMA/EXPACS," PLoS ONE, vol. 10, Dec. 2015, Art. no. e0144679.
- [10] M. Cecchetto, R. Garcia, F. Wrobel, A. Coronetti, K. Bilko, D. Lucsanyi, et al., "0.1–10 MeV Neutron Soft Error Rate in Accelerator and Atmospheric Environments," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 68, pp. 873–883, May 2021.