

放射線工学部会セッション

環境放射線と半導体デバイスのソフトウェア

Soft errors in semiconductor devices due to environmental radiation

環境放射線起因ソフトウェアのシミュレーション

Simulation of soft errors due to environmental radiation

*安部 晋一郎¹¹ 日本原子力研究開発機構

1. はじめに

半導体デバイスに対する放射線影響として、1つの放射線によってメモリ素子の保持するデータが反転する現象（シングスイートアップセット, SEU）があり、これによって電子機器に一時的な誤動作（ソフトウェア）が生じる。地上環境におけるソフトウェアは中性子が主因であり、近年はミューオンの影響も懸念されている。中性子やミューオンは透過性が高く遮蔽が困難なため、電子機器の信頼性を保証するためにはソフトウェア発生率（SER）を事前に評価することが重要となる。

SER 評価方法としては実測的な方法とシミュレーションがある。放射線照射施設で中性子やミューオンを実際に照射して評価する方法（加速試験）は、実際の発生率を把握する上で非常に有用であるが、ビームタイムには限りがあるため多くの電子機器を評価することは困難である。一方、シミュレーションで SER を精度よく評価できれば、デバイス製造前の段階で評価を行い、その結果を早期にフィードバックすることでソフトウェア対策技術の研究開発を効率よく進めることに役立つ。

このような状況において、我々は企業や大学・研究機関と協力して、ソフトウェアシミュレーション技術の研究開発やソフトウェア発生率の物理過程の詳細解析、SER 評価手法の構築などに取り組んでいる。

2. ソフトエラーシミュレーション技術の研究開発

ソフトウェアの原因となる SEU の発生過程は、核反応過程、電荷付与過程、電荷収集過程の3つに大別される。我々の研究では、核反応過程および電荷付与過程の解析には放射線挙動解析コード PHITS [1]を、電荷収集過程の解析には3次元 TCAD システム HyENEXSS [2-4]を利用しており、これまでの研究で PHITS と HyENEXSS を連成させたマルチスケールモンテカルロシミュレーション手法 PHYSERD [5]を構築した。図1に PHYSERD による解析結果の一例を示す。このような詳細な解析はソフトウェア発生メカニズムを理解する上で有用な知見が得られるが、1つの核反応イベントの解析に数時間、場合によっては十数時間要することもある。SER 評価には多くの核反応イベントを解析する必要があるため、PHYSERD を SER 評価に適用することは計算コストの面で課題がある。

シミュレーションによる SER 評価では、計算コスト低減のために有感領域モデルを用いて収集電荷量を概算することが一般的である。有感領域モデルには、単一有感領域（SSV）モデルと多重有感領域（MSV）モデルの2種類がある。SSV モデルでは、半導体デバイス内に有感領域を1つ定義し、その有感領域に付与された電荷は全て収集されると仮定して収集電荷量を概算する。このときの有感領域の形状はトランジスタのアクティブ領域面積やファネリング長に基づいて定義される。ただ、近年の最先端デバイスに関しては SSV モデルでは計算精度に問題が生じることが多々ある。MSV モデルでは、半導体デバイス内に複数の有感領域を定義し、各領域における電荷収集効率（付与電荷量に対する収集電荷量の割合）を考慮して収集電荷量を概算する。PHYSERD の詳細解析結果を基準値として SSV モデルと MSV モデルの精度検証を行った結果、図2に示すように、MSV モデルによる核反応イベント1つ1つの収集電荷量の概算値は PHYSERD による結果と良い一致を示す[6,7]。なお、MSV モデルの有感領域の形状や電荷収集効率は、TCAD シミュレーションによる電荷収集過程の系統調査結果などに基づいて定義するため、SSV モデルと比較すると追加の計算コストを要するが、PHYSERD と比較すると SER 評価に要する計算コストは10～20%程度まで低減される。

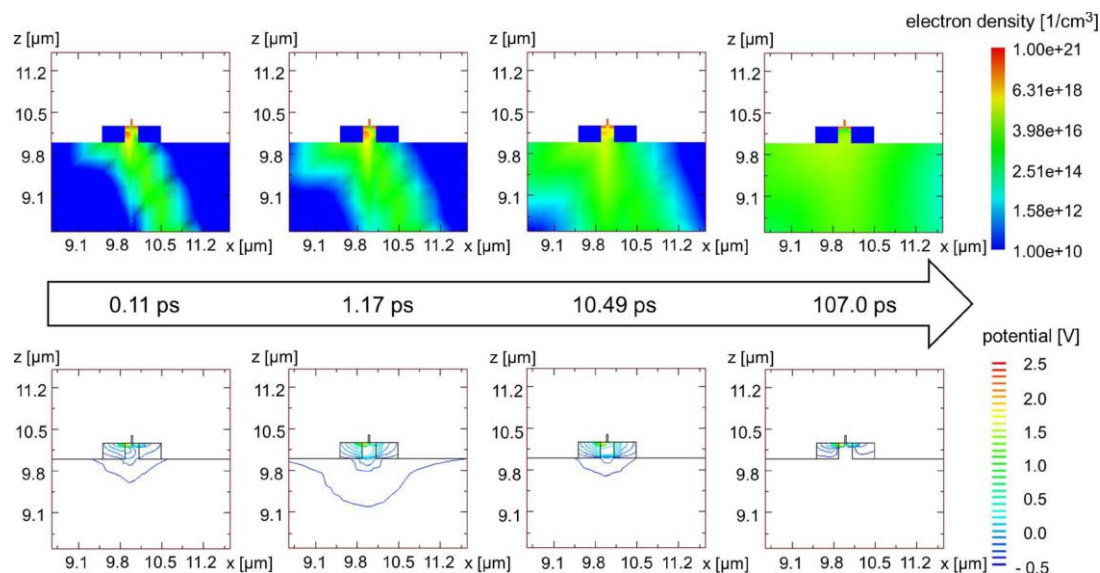


図 1. PHYSERD を用いた核反応イベントの過渡応答解析結果 [5]

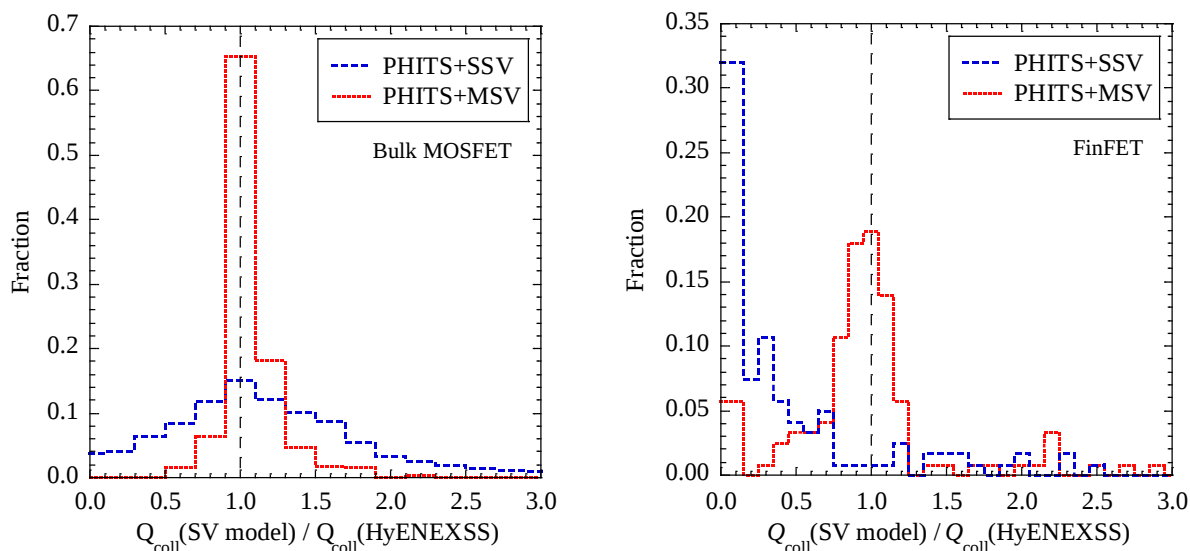


図 2. Bulk MOSFET (左) と FinFET (右) に関する収集電荷量の相対値の度数分布 [6,7]

3. ソフトエラー発生の物理過程の詳細解析

シミュレーションは、物理現象をモデル化してコンピュータ上で模擬計算を行うため、現実では観測が困難な情報を計算結果から抽出することが可能であり、測定結果の物理的解釈やソフトウェア対策法の研究開発において役に立つ。また実験前にシミュレーションを行うことで、有意な測定結果を得るために必要なビーム条件やマシンタイムなどを予測することも可能である。

一例として、東北大学のサイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) で実施した、準単色中性子照射 SEU 測定実験の結果とその解析結果[8]を示す。この研究では、中性子照射施設での加速試験において、中性子照射方向が測定結果にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的とした。試験ボードの樹脂製パッケージ側とプリント基板側からそれぞれ中性子を照射したところ、図 3 に示すように、樹脂製パッケージ側から照射すると SEU 発生率が 3 割から 5 割高くなることが分かった。この実験結果について PHITS+MSV モデルを用いて解析を行ったところ、図 4 に示すように樹脂製パッケージ側から照射した際に二次軽イオン起因 SEU 発生率が高くなることが明らかになった。特に水素イオンの寄与が照射方向によって大きく異なるが、これは樹脂に含まれる水素原子と入射中性子との弾性散乱によって二次陽子が前方に多く放

出されることが原因であることも詳細解析から判明した。この結果から、パッケージの材質を樹脂から水素原子を含まないセラミックに変更することで、SEU 発生数を低減できるという知見も得られた。

また別の例として、ミューオン起因ソフトウェアに関する研究成果[9]を示す。研究に着手した当時、ソフトウェアに対するミューオンの直接電離や負ミューオン捕獲反応の影響について、いくつかの先行研究が行われていたが、環境ミューオン起因ソフトウェアに関する知見は十分とは言えなかった。そこで、PHITS のミューオン仮想光子核反応モデルおよび負ミューオン捕獲反応モデルを新規開発し、PHITS+MSV モデルを用いて環境ミューオン起因 SER の解析を行った。その結果、図 5 に示すように、建屋やサーバー筐体による遮蔽効果まで考慮すると、環境中性子起因 SER に対して環境ミューオン起因 SER は中性子起因 SER に対して 20%程度と、その影響は無視できないことが判明した。また環境ミューオン起因 SER の主因は負ミューオン捕獲反応で、仮想光子を介したミューオン核反応の影響は小さいことも明らかになった。このシミュレーション結果を受け、J-PARC の物質・生命科学実験施設においてミューオン照射ソフトウェア測定実験を行い、ミューオンが半導体デバイス内に停止するエネルギーで照射したときに、正ミューオンに比べて負ミューオンの方が SEU 発生率が高くなることを実験的に初めて明らかにした。

4. まとめ

本稿ではこれまでの研究成果を踏まえて、ソフトウェアシミュレーション手法および SER 評価におけるシミュレーションの有用性について記載した。本講演では、最新の研究成果についても紹介する。

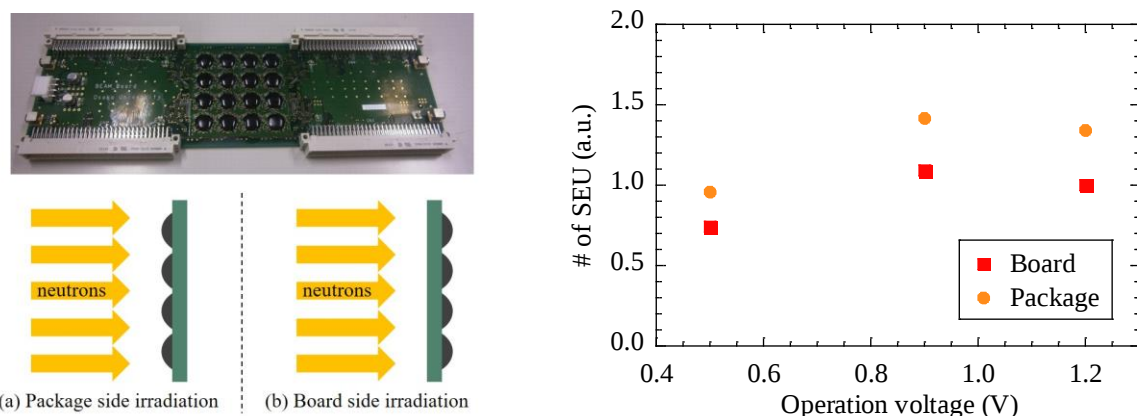


図 3. 試験ボードと照射方向の概念図（左）および 65MeV 準単色中性子照射 SEU 測定結果（右） [8]

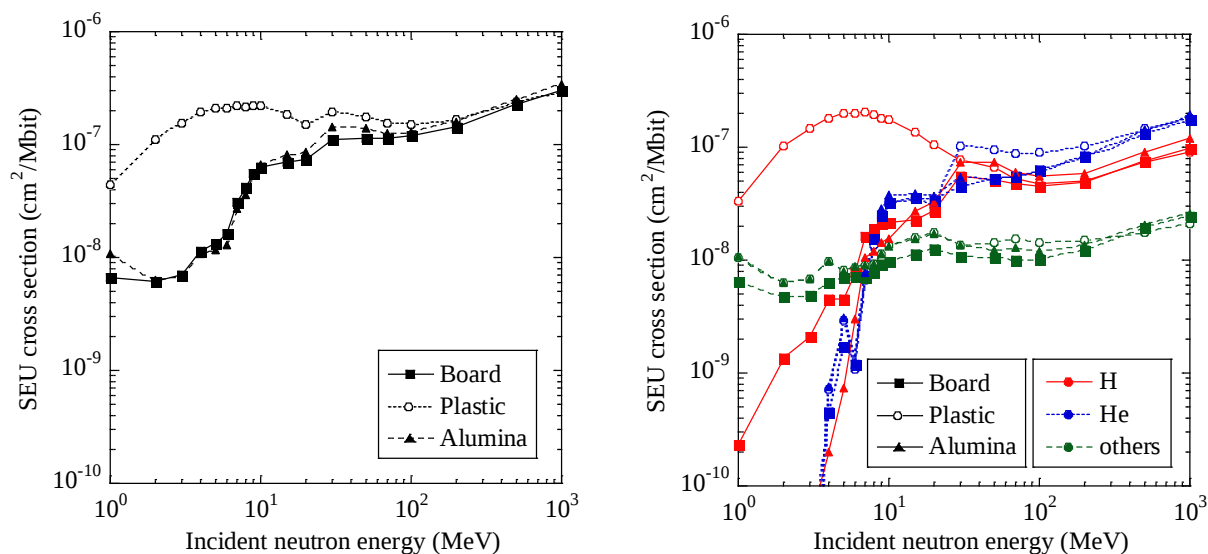


図 4. PHITS+MSV モデルで算定した中性子起因 SEU 断面積（左）および二次イオン種の寄与（右） [8]

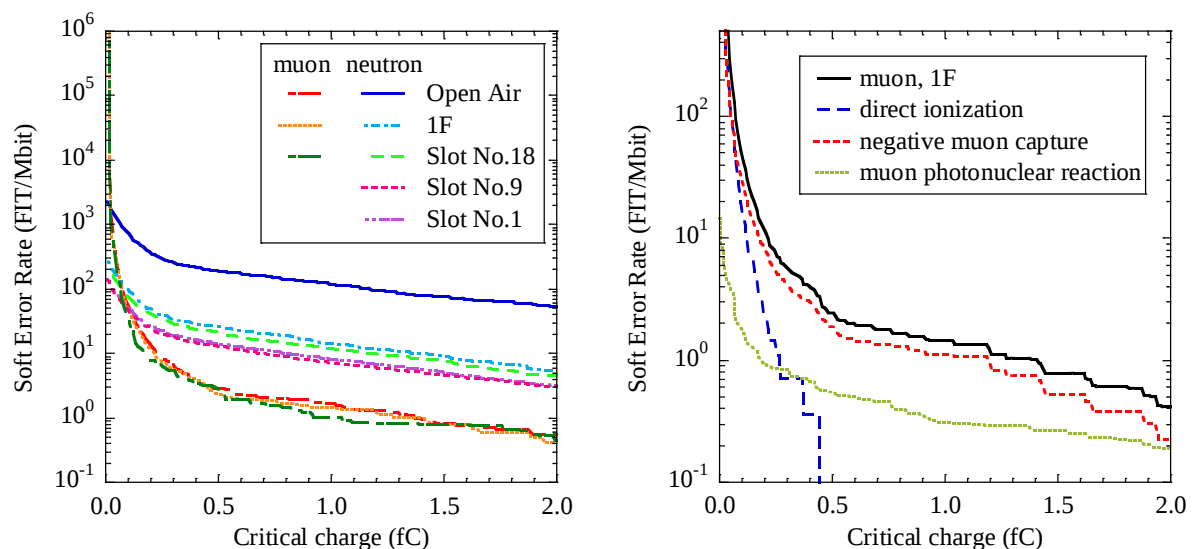


図 5. 屋外、建屋 1 階およびサーバー筐体内における環境中性子およびミューオン起因 SER (左) および環境ミューオン起因 SER における各物理過程の寄与 (右) [9]

謝辞

本研究の一部は、笹川科学研究助成 (2011 年度, 研究番号: 23-216)、日本学術振興会 特別研究員(DC2)奨励費 (2012 年度～2013 年度, 課題番号: 24-7673)、日本学術振興会 科研費 (2016 年度～2018 年度, 課題番号: JP16H03906)、科学技術振興機構 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (JST-OPERA) (2017 年度～2021 年度, 課題番号: JPMJOP1841)、日本学術振興会 科研費 (2019 年度～, 課題番号: JP19H05664) の助成を受けるとともに、(株)半導体理工学研究センター (2008 年度～2010 年度)、富士通セミコンダクター(株) (2011 年度～2014 年度)、(株)ソシオネクスト (2015 年度～) から支援を受け、筑波大学、大阪大学、九州大学、京都工芸繊維大学、京都女子大学、東京大学、東北大学、京都大学、大阪工業大学、高度情報科学技術研究機構、宇宙航空研究開発機構、高エネルギー加速器研究機構、(株)日立製作所、HIREC(株)と協力して遂行したものです。この場を借りて感謝を述べさせていただきます。

参考文献

- [1] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 55, pp. 684-690 (2018).
- [2] N. Kotani, *Proc. of Int. Conf. Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD)*, Leuven, Belgium, Sep. 2-4, 1998, pp. 3-7 (1998).
- [3] 和田哲典, 藤永正人, 大蔵康幸 et al., 第 53 回応用物理学学会関係連合講演会 講演予稿集, 22p-ZA-2 (2006).
- [4] 中村光利, 応用物理, vol. 77, pp. 818-822 (2008).
- [5] S. Abe and Y. Watanabe, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 61, pp. 3519-3526 (2014).
- [6] S. Abe and T. Sato, *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 53, pp. 451-458 (2016).
- [7] 安部晋一郎, 佐藤達彦, 加藤貴志 et al., 第 78 回応用物理学学会周期学術講演 講演予稿集, 7a-PB3-8 (2017).
- [8] S. Abe W. Liao, S. Manabe et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 66, pp. 1374-1380 (2019).
- [9] S. Abe and T. Sato, *IEEE Conf. Pub.*, PE.6.1 (2017).
- [10] S. Manabe, Y. Watanabe, W. Liao et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 65, pp. 1742-1749 (2018).

*Shin-ichiro Abe¹

¹Japan Atomic Energy Agency