

J-PARC における熱中性子領域までの半導体 ソフトエラー断面積の飛行時間測定

岩下 秀徳^{*1,2} 木内 笠^{*1} 広島 芳春^{*1} 奥川雄一郎^{*1} 瀬邊 智己^{*2}
Iwashita Hidenori Kiuchi Ryu Hiroshima Yoshiharu Okugawa Yuichiro Sebe Tomoki

武多 実紀^{*2} 佐藤 博隆^{*2} 加美山 隆^{*2} 古坂 道弘^{*2} 鬼柳 善明^{*2}
Takeda Miki Sato Hiroataka Kamiyama Takashi Furusaka Michihiro Kiyanagi Yoshiaki

1. はじめに

筆者らは、大強度陽子加速器施設（J-PARC）にて熱中性子領域から 0.1 MeV までの中性子エネルギー依存のソフトエラー断面積の測定に成功し、既に 2020 年に成功していた高エネルギー領域（～800 MeV）における測定とあわせて、ほぼすべてのエネルギー領域での半導体ソフトエラー特性の全貌を世界ではじめて明らかにした¹⁾。

現在の社会インフラを支える電子機器においては、宇宙線（太陽フレアや銀河から飛来する放射線）に起因する誤動作であるソフトエラーの対策が不可欠である。中性子エネルギーごとのソフトエラー断面積の解明は、その対策を行う上で最も重要なものである。今後は、この結果を活用しソフトエラー対策を更に進展させることで、より安全・安心な社会インフラの実現が可能となる。

2. 背景

高性能な電子機器が、様々な分野で私たちの暮らしを支えている一方で、宇宙現象による「ソフトエラー」が増加している。宇宙から降り注ぐ宇宙線が、大気圏にある酸素や窒素に衝突すると、中性子が発生する。この中性子が、電子機器の半導体に衝突すると、保存されたデータが書き変わる現象「ソフトエラー」を引き起こし、場合によっては通信障害等の社会インフラに重大な影響をおよぼす可能性がある（図 1）。

電子機器におけるソフトエラーの対策を行うためには、その機器ごとのソフトエラーによる故障頻度

を考慮したシステム設計が重要となる。一方で、ソフトエラーは中性子のエネルギーによって、発生率が異なる。中性子がソフトエラーを引き起こす指標としてはソフトエラー断面積 $\sigma(E_n)$ が用いられ、下記の式で表せる。

$$\sigma(E_n) = \frac{N_{SEU}(E_n)}{\Phi(E_n)} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\Phi(E_n)$ は半導体デバイスに照射された単位面積当たりの中性子数（中性子フルエンス）で、 $N_{SEU}(E_n)$ はそれら中性子によって生じたソフトエラーの発生数である。なお、ソフトエラー断面積は、半導体デバイスごとに異なり、環境中の中性子や加速器で生成される中性子は、それぞれ異なるエネルギー分布を持つので、環境ごとの中性子フラックス（単位面積・時間当たりには通過する中性子の数）のエネルギー分布 $\psi(E_n)$ を考慮してソフトエラー発生率 SER（Soft error rate）を式（2）で算出できる。

$$SER = \int_0^{\infty} \sigma(E_n) \psi(E_n) dE_n \dots \dots \dots (2)$$

このように、ソフトエラー断面積 σ は、ある環境におけるソフトエラー発生率を算出するためには不可欠なデータであるが、従来はソフトエラー断面積 σ の中性子エネルギー依存性の測定は困難な状況であった。そこで、筆者らは飛行時間法によるソフトエラー断面積の中性子エネルギー依存性の測定を行った。

3. 飛行時間法を用いたソフトエラー断面積測定手法

中性子のエネルギーを測定する手法として、飛行

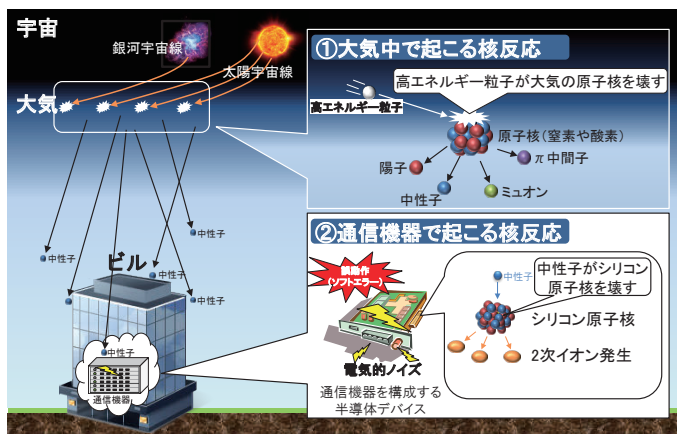


図1 ソフトエラー発生過程

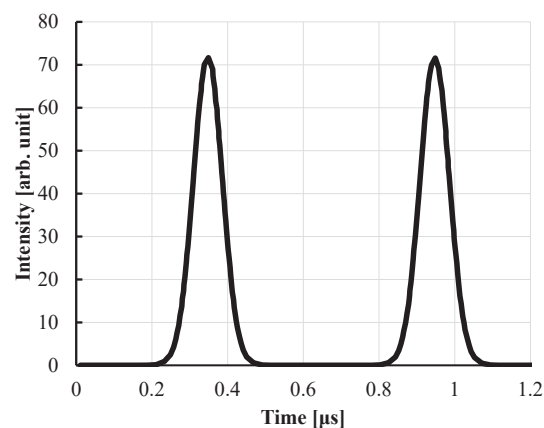


図2 J-PARCでの陽子パルス

時間法（中性子が飛行した距離と時間から速度を割り出し、エネルギーへ変換する手法）があるが、数 ns～数 ms で飛行する中性子によって引き起こされたソフトエラーを検出するのが従来は困難であった。そこで、筆者らは FPGA（field-programmable gate array）を用いて ns オーダーでソフトエラーを検知できる回路を考案した。FPGA は、ユーザーが論理回路をプログラミングしたデータを FPGA 内のメモリに保存し、そのデータを元に回路が動作する。メモリ内にソフトエラーが発生すると、直ちに論理回路が異常となるため、その異常動作を検出する回路を組み込むことで、高速に検出する回路を作成した。

4. 実験

J-PARC では、物質・生命科学実験施設（MLF）に設置された BL10 中性子源特性試験装置（NOBORU）で測定した。図 2 に、加速器出力 200 kW で測定された陽子パルスの時間特性を示す²⁾。このように、本施設における陽子パルスはピーク間が 600 ns のダブルバンチであるため、約 0.1 MeV 以上の高エネルギー領域でのエネルギー分解能は高くないが、それ以下のエネルギー帯では、十分にソフトエラー断面積のエネルギー依存性は測定可能である。

5. 結果と考察

図 3 に今回測定した FPGA40 nm ソフトエラーの飛行時間スペクトルを示す。図 3(a) は 20 ns の時

間幅で処理したもので、J-PARC の陽子ダブルパルスの影響で、ソフトエラーも 2 つのピークを明確に測定できている。図 3(b) は 10 μs の時間幅で処理したものである。

図 4 に、ソフトエラー断面積を示す。青線が J-PARC での測定結果で、黒線が 2020 年に測定した米国ロスアラモス国立研究所で測定した結果である。5 MeV 未満のソフトエラーは酸素及びシリコンの弾性反跳によって引き起こされ、10 MeV 付近の急激な増加は、(n, p) 及び (n, α) 反応によって引き起こされていると想定される。0.1 MeV 以下は、 $1/\sqrt{E}$ ($1/v$ 法則) に従っているため、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応が原因と想定される。デザインルールが約 150 nm 以上の数世代前の半導体は、ホウ素を多く含む BPSG (borophosphosilicate glass) が使用されており熱中性子によるソフトエラーが問題となっていたが、本デバイスは、BPSG を使用しない近年のデバイスであるため、P 型半導体を構成するのに必要な不純物としてシリコンにドーピングされたホウ素等の影響と想定される。

6. まとめ

筆者らは、J-PARC にて、FPGA のソフトエラー断面積を飛行時間法で測定した。その結果、ソフトエラーは、高エネルギー中性子だけでなく、熱中性子領域でも高くなることが判明した。本データにより、地表面や加速器環境等の様々な中性子環境におけるソフトエラー発生率が算出可能となる。

本研究は J-PARC Proposal No.2022A0249 によって行われた。

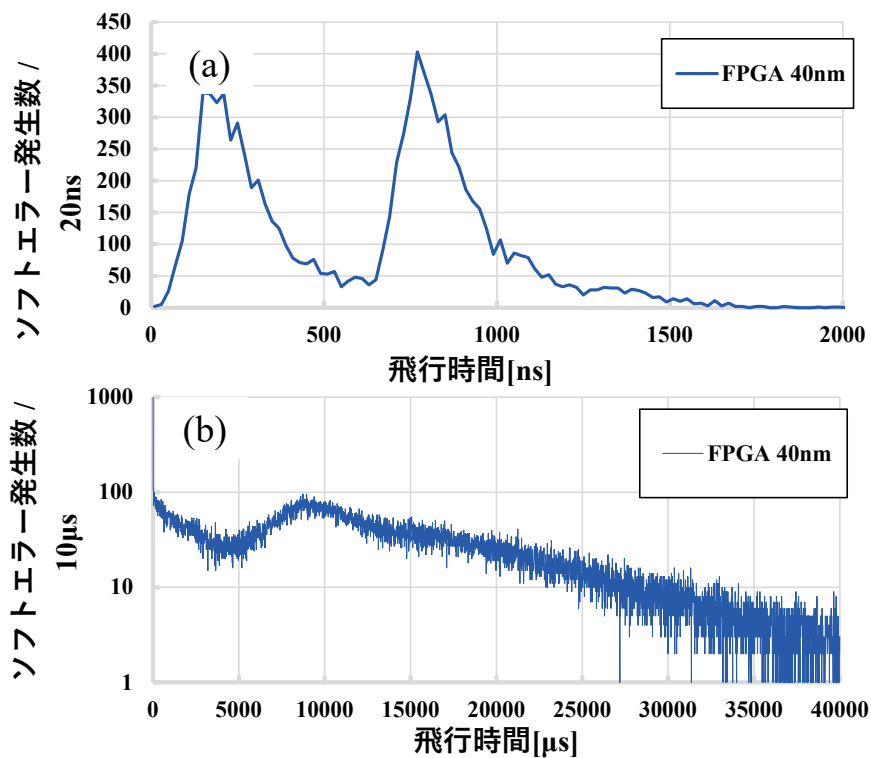


図3 J-PARC で測定したソフトエラー発生数の飛行時間分布

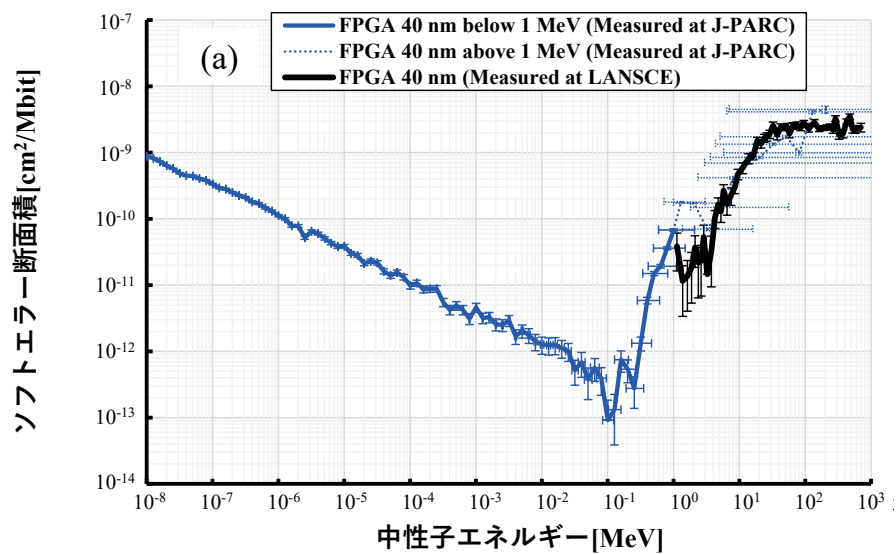


図4 J-PARC で測定したソフトエラー断面積

参考文献

- 1) H. Iwashita, *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **70**, 216 (2023)
- 2) H. Hasemi, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* **773**, 137 (2015)

(* ¹NTT 宇宙環境エネルギー研究所, *² 北海道大学
大学院工学研究院)