

氏 名 牧野 高紘

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1228 号

学位授与の日付 平成 21 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 論理 LSI における放射線誘起シングルイベント過渡パルス
とソフトエラー率に関する研究

論文審査委員 主 査 教授 池田 博一
准教授 廣瀬 和之
准教授 戸田 知朗
教授 田島 道夫（宇宙航空研究開発機）
教授 高橋 芳浩（日本大学）

衛星に搭載された論理LSIは、軌道上を飛び交う放射線によって一時的な誤動作を引き起こす。この一時的な誤動作をソフトエラーと呼ぶ。ソフトエラーのひとつとして、シングルイベントアップセット（SEU）現象が良く知られている。SEUは、論理LSI中の記憶素子に放射線（例えば重イオン）が入射することで生じるデータ反転（ソフトエラー）であり、これまで様々な研究や対策がとられて来た。しかし、近年もう一つのソフトエラーとして、シングルイベント過渡現象（SET）が新たに顕在化してきた。SETは、論理LSI中の論理素子にイオンが入射することによって生じる過渡的な電圧変動であり、その過渡電圧パルス（SETパルス）が回路中を伝播し、ラッチ等の記憶素子の状態を変えることでソフトエラーを引き起こすものである。SETによるソフトエラーの発生頻度（ $SE R_{SET}$ ）は、論理素子で発生するSETパルスの時間幅と論理LSIの動作周波数の増加に伴って大きくなることが指摘されており、今後論理LSIの更なる高速化によって $SE R_{SET}$ の増加が懸念要因となっている。しかし、 $SE R_{SET}$ を見積もる手法やこれを低減するための対策が確立していないのが現状である。

従来、SETパルスが記憶素子にラッチされる確率をSETパルス幅の関数として求めることができると言われてきた。一方、発生するSETパルス幅は、イオンの入射位置によって異なるために、単一エネルギー付与（LET）のイオンを入射しても、SETパルス幅が分布を持つことが報告されている。以上の状況をふまえ、種々の論理素子の正確なSETパルス発生率をパルス幅の関数として測定し、その発生率と各パルスが記憶素子にラッチされる確率から、当該論理素子における $SE R_{SET}$ が推定できると言われてきたが、実験的に実証されていない。また、SETパルス幅分布が入射放射線のLETに依存することも報告されているが、LET依存性の詳細とSETパルス幅を支配する要因についても究明されていない。そこで、SETパルス幅分布のLET依存性と、パルス幅の決定要因を明らかにすることができれば $SE R_{SET}$ 低減策の提案につながると考えた。具体的には、SET対策のために必要な基礎的知見を得るために、SETパルス発生率の測定とソフトエラー率の推定、SETパルス幅のLET依存性測定、さらにシミュレーションを援用したSETパルス幅のLET依存性の要因解明を行うことにした。

まず、SETパルス発生率を取得するために、Snapshot回路を用いてNOR素子内に発生するSETパルス発生率を測定した。Snapshot回路は、試験対象の論理素子で発生したSETパルスを“000、、111、、000”のようにビット列で捕捉するものである。捕捉された“1”の数はSETパルス幅に対応しており、較正用のテストパルスによって予め得られている“1”の数とパルス幅との関係を用いて発生したSETパルス幅を算出することができるようになっている。Snapshot回路とNOR素子は、ゲート長0.2ミクロンの完全空乏型SOI技術で製作されたものを用いた。測定は原子力機構の加速器施設（TIARA）で行い、Krのイオン（LET=40MeV・cm²/mg）ビームを用いた。本測定では、試験対象素子へのイオン照射量を正確に知ることが必須であるため、照射場で使用する放射線検出器と最適な照射量を十分検討した上で照射を行った。具体的には、照射粒子束を、 3.5×10^4 particles/cm²sec程度に制御して照射を行った。測定の結果、NOR素子内に誘起されるSETパルスの幅は0.1

ns から 1. 1 ns に渡って分布していた。この発生率とラッチ確率を用いて求められた $SE R_{SET} (= 1. 32 \times 10^{-10} \text{ cm}^2)$ は、 $SE R_{SET}$ 測定用に別途作成したスキャン FF を実装した論理 LSI を用いて得られた $SE R_{SET} (= 1. 15 \times 10^{-10} \text{ cm}^2)$ と非常によい一致を示した。このようにして、論理素子内での SET パルス発生率から $SE R_{SET}$ が求められることをはじめて実証することができた。また、種々の論理素子で SET パルス発生率を測定することで、実際の論理 LSI での $SE R_{SET}$ を推定できることになった。

つぎに、SET パルス幅分布の LET 依存性を知るために、0. 2 ミクロン FD-SOI 技術で製作された NOT 素子に LET を変えた数種のイオンを照射し、それぞれのイオンで誘起される SET パルス幅分布を Snapshot 回路により測定した。本測定では、Kr イオン ($LET = 40 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$) と Xe イオン ($LET = 66 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$) とを用いて、広範囲の LET を得た。具体的には、イオンの入射角度を変えることにより実効的に $LET = 40, 56, 62, 68, 92 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ での入射を可能とした。パシベーション膜下の Si 活性層表面への入射 LET の計算には、SRIM コードを用いた。測定の結果、全ての LET において NOT 素子内に誘起される SET パルスの時間幅は、0. 1 ns 程度から 1. 0 ns に渡って分布することがわかった。各 LET で取得された SET パルス幅の分布の中心値を LET に対してプロットすると、SET パルス幅は、 $LET = 40 \sim 92 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ の範囲で LET 増加とともに飽和傾向を示していた。本知見に基づいて、宇宙応用の観点から本 NOT 素子に SET 対策を施す際は、考慮すべき最大パルス幅を 1. 0 ns とすれば良いことが分かった。また、発生する SET パルス幅の最大値と分布の中心値が NOR 素子に比べ NOT 素子で短いため、 $SE R_{SET}$ は、NOT 素子の方が前述の NOR 素子の場合よりも小さくなると期待できる。

さらに、SET パルス幅を支配する要因を明らかにするために、三次元デバイス回路混合シミュレーションを行った。三次元デバイス回路混合シミュレーションは、論理素子を構成する複数のトランジスタのうち、放射線が当たったトランジスタのみをデバイス(半導体)モデルで取り扱い、それ以外のトランジスタは SPICE (回路)モデルで取り扱うようになっているものである。シミュレーションでは、NOT 素子内の n 型の FD-SOI MOSFET の Body 中心から 50 nm だけドレインよりにイオンが入射したと仮定して NOT 素子での電圧パルスを求めた。実験をより正確に再現するにはイオンがトランジスタ中に生成する電荷の分布を正確に入力する必要があるが、従来ガウス関数型の簡易的な電子正孔対分布生成モデルしか用いられていなかったところ、本研究では Kobetic h と Katz の理論を基に現実的な電子正孔対分布を実験に用いたそれぞれのイオン種ごとに求め、独自の手法でシミュレータに導入した。このようにして、SET パルス幅の LET 依存性を、キャリア再結合を考慮しない場合とした場合とで比較することにより、再結合の考慮によって SET パルス幅が LET の増加とともに飽和傾向を示すこと、また SET パルス幅自体も短くなることが分かった。すなわち、再結合が SET パルス幅の増加傾向を抑制する重要な要因の一つであることがはじめて明らかとなり、SET 低減には再結合に寄与するデバイスパラメータの制御が有効であると提言することができた。

論文の審査結果の要旨

本審査委員会は、物理科学研究科、宇宙科学専攻、牧野高紘君の出願にかかる学位申請博士論文「論理 LSI における放射線誘起シングルイベント過渡パルスとソフトエラー率に関する研究」について、博士の学位を授与するに相応しいものであると全員一致で判断した。

上記論文は、人工衛星に搭載された論理 LSI に入射する放射線によって引き起こされるシングルイベント過渡パルスを研究対象としている。シングルイベント過渡パルスによって引き起こされるソフトエラーとは、記憶素子自体におけるソフトエラーであるシングルイベントアップセットとは異なり、記憶素子と記憶素子の段間に配置された組合せ回路において発生する過渡パルスが高速クロックによって動作する記憶素子に捕捉されてしまう現象をいう。本研究では、特に宇宙環境における集積回路の高信頼化の観点から有望と考えられている 0.2 ミクロン完全空乏型 SOI プロセスを用いて製作された過渡パルス幅測定回路に、重イオンビームを照射することによって、論理素子 (NOR 及び NOT) において発生する過渡パルス発生率をその時間幅の関数として測定している。その結果、記憶素子が任意のクロック周波数で動作している場合にも、そのソフトエラー率を高精度で導くことが可能であることを見出している。さらに、過渡パルスの発生率を高 LET (Linear Energy Transfer) 領域 ($40 \sim 100 \text{ MeV cm}^2/\text{mg}$) において測定することにより、過渡パルスの時間幅が LET の関数として飽和傾向を示すか否かというこれまでの議論に対して、実験的に飽和傾向を支持する結論を導いている。その結果、0.2 ミクロン完全空乏型 SOI プロセスにおける論理素子 (NOR 及び NOT) の発生する過渡パルスの時間幅は、高々 1 ns にとどまることを結論した。さらに、上記飽和傾向が再結合過程に強く依存していることをデバイスシミュレーションの援用により示している。このようにして、本研究は、宇宙環境における高速論理回路の高信頼化設計に対して、回路設計の観点およびデバイス設計の観点から顕著な寄与をなしたものであり、博士論文としての独創性を有し、かつ十分な学術水準に達していると認められる。また、出願者は、過渡パルス計測手法の検討、重イオンビームの照射計画、ビームフラックスのモニター、照射サンプルからのデータの取得、解析、さらには解析結果の検討について本研究をリードしたものであり、主体的な研究への取り組みが認められる。

審査委員会では、本論文の主題に関する事項のほか、宇宙の放射線環境、放射線と半導体の相互作用、半導体デバイスの重イオン入射による電荷生成、電荷収集過程、さらに、本論文において比較対象となっているスキャン FF を実装した論理 LSI によるソフトエラー率の測定手法についての質疑応答を行い、これらに対する確かな回答を得た。また、本論文は、日本語にて作成されているため、英語で作成した博士論文概要説明、および IEEE Trans. on Nucl. Sci. に掲載予定の主著論文「T. Makino et al., LET dependence of single event transient pulse-widths in SOI logic cell」の原稿によって英語能力が担保されていることを確認した。

なお、本論文は、新たに作成されたものであり、本人を筆頭著者とする審査制度の確立した学術雑誌に掲載予定の論文を除けば、既に発表された投稿論文、学位論文と同一または同趣旨の論文ではないことを付記する。