

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02217

研究課題名（和文）高信頼性LSIの開発コスト削減に向けたソフトエラー耐性スクリーニングの実現

研究課題名（英文）Soft-Error Screening for Low-Cost High-Reliability LSI Development

研究代表者

小林 大輔（Kobayashi, Daisuke）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：90415894

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：マイクロプロセッサのようなデジタル半導体チップにとって重要で、かつ、放射線ソフトエラーに弱いLSIとして知られるSRAM（Static Random Access Memory）に着目して、「断面積」と呼ばれる放射線ソフトエラー耐性を示すパラメーターと「データ保持電圧」と呼ばれる電気パラメーターの相関について研究した。その結果、放射線ソフトエラー耐性を記述する新しい数理モデル（方程式）の開発に成功した。そこにはデータ保持電圧だけでなく、放射線の強さを示すパラメーターやSRAMの電源電圧や回路構造のパラメーターも組み込まれており、放射線試験をしなくてもソフトエラー耐性についてわかることが増えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した数理モデル（方程式）には従来のようなフリーパラメーターがなく全てのパラメーターの物理的意味が明解という特徴があり、放射線の強さや電源電圧が変わったらソフトエラー耐性がどう変わるかが一目でわかる。このことはソフトエラー耐性が何で決まっているかを明確にした点で学術的意義がある。また、パラメーターが変わったとき（例えば動作電圧を変えたとき）に改めて放射線試験をしなくてもわかることが多い。コストが高いことで知られる放射線試験の回数を減らしても半導体の信頼性を担保できる可能性を示した点で社会的意義がある。この数理モデル（方程式）を発表した論文は最優秀論文賞を受賞した。

研究成果の概要（英文）：Focusing on static random access memories (SRAMs), which are known as an important large scale integration (LSI) part for digital semiconductor chips such as microprocessors but also known as a vulnerable part to radiation soft errors, we investigated a correlation between the soft-error cross-section and the data retention voltage. We developed a new mathematical model (equation) that describes the soft-error cross section. It involves not only the data retention voltage but also radiation parameters as well as parameters for SRAMs such as power supply voltage and structures. It enables us to predict many things about the soft error tolerance without using radiation.

研究分野：電子デバイスおよび電子機器関連

キーワード：品質管理 機器・人間の信頼性 低炭素社会 放射線 量子ビーム産業応用

1. 研究開始当初の背景

ソフトエラーは放射線によって起きる LSI (Large Scale Integration) の誤動作である。LSI は大規模集積回路のことで、いわゆる半導体チップのことである。ソフトエラーは半世紀以上の長い歴史に加え、大抵の教科書には載っているほど有名なこともあって、解決済みの古い問題と誤解されることがある。しかし、実際はそのようなことはなく、今でもソフトエラーによる経済的損失などが報じられている。近年はカーエレクトロニクスのように LSI と人の関わりが密接になり、その誤動作は人命に影響を与えかねないため、ソフトエラーに対する耐性確保が重要になっている。

そこで、ソフトエラー耐性に優れた新しい LSI を開発しようという研究が盛んである。そのような研究動向とは違う視点で歴史を辿ると、別の課題に気づく。どんなに優れた技術であっても、製造工程のばらつきにより一定数の不良品が出ることは避けられない。そのような不良品を市場に出る前に取り除く「スクリーニング」は様々な故障に備えて実施されているが、ソフトエラー耐性ではなされていない。

なぜか。それは、ソフトエラー耐性を、放射線を使わずに予測できるすべがないからと我々は考えた。ソフトエラーの研究は、実際に(ないしはシミュレーターを使って仮想的に)放射線を当ててエラーを観測することが基本である。しかし、それをどんなに突き進めても、放射線を当てなかったチップについては言えないことが残る。例えば、一括大量生産で作ったチップに対して抜き取り検査の原理を用いれば、手にしたチップが不良品かどうかの「確率」を言えるようになる。しかし、手にしたチップが実際に不良品であるかどうかは照射しない限り特定できない。もちろん、全チップに放射線を当てれば特定できるが、放射線ビームの高いコストに阻まれて成立しない。ソフトエラー耐性のスクリーニングを実現するには、放射線を当てないとわからないという今の限界を超えなければならない。

本研究課題の前に我々は、マイクロプロセッサのようなデジタル半導体チップにとって重要で、かつ、放射線に弱い LSI として知られる SRAM (Static Random Access Memory) に着目して、ソフトエラー耐性と良い相関がある電気パラメーターを発見していた。それは SRAM が持つ「データ保持電圧 V_{DR} 」である。そこで、その相関を用いれば今の限界を超えてスクリーニングできるのではないかと考えた(図 1)。

2. 研究の目的

ソフトエラー耐性の LSI スクリーニングを実現すること。そのために、SRAM を対象とし、データ保持電圧 V_{DR} から各チップのソフトエラー耐性を言い当てられる技術を開発すること。

3. 研究の方法

研究代表者が理論とレーザー実験、研究分担者が放射線実験を担当した。当初は次のような研究を想定していた。

1. まず、次の前提条件をおく。
 - そもそも設計や製造プロセスが異なる異種間の比較は目的としないこと。これは、LSI が複写の原理で一括大量生産しているからで、スクリーニングはその中から不良品を除去する技術だからである。
2. その上で、次の実証を目指す。
 - 一度(例えば開発時に)ソフトエラー耐性を測定してデータ保持電圧 V_{DR} との相関を得ておけば、それを検量線として使うことで、以降(例えば量産時には) V_{DR} を読み取ることでソフトエラー耐性の良し悪しを評価できてスクリーニングできること。

しかし、新型コロナウイルス感染症の流行に伴って実験が困難になったため、実験の準備をできる限り進めつつ、理論的な研究に重点的に取り組んだ。具体的には次のことを実際に行った。

1. ソフトエラー耐性が SRAM のデザインとどう関係しているか文献調査した。本研究課題に先立って調査してきたものを、本研究課題において整理して詳しく論じた。

2. 前記1項で得られた知見を、我々が発見したデータ保持電圧 V_{DR} とソフトエラー耐性の相関に組み合わせて、SRAMのソフトエラー耐性を記述する数理モデル(方程式)を開発した。
3. 実験に向けて、放射線照射装置やレーザー照射装置の改良を行った。特にレーザー照射装置については、先行研究を参考に疑似ベッセルビームを導入して、放射線と比較した。また、半導体デバイス・シミュレーションを用いて実験を補った。

4. 研究成果

(1) 主な成果

本研究課題が始まった時点では、図1のように電気パラメータ「データ保持電圧 V_{DR} 」とソフトエラー耐性パラメータ「断面積()」に良い相関があることがわかっていて、これを検量線に用いることを考えていた。なお、断面積()は、SRAMメモリーセルのうち放射線が当たるとソフトエラーを起こす領域の面積のことである。ソフトエラー耐性の観点では、この値は小さい方がよい。大きくなるとソフトエラーを起こす領域に放射線が当たる確率が大きくなるからである。

本研究課題期間中は、新型コロナウイルス感染症の流行に伴う実験の困難さを踏まえ、図1の式の理論的な研究に重点的に取り組んだ。その結果、図2に示す数理モデル(方程式)を開発した。開発した方程式には記号が多いため複雑に思えるかもしれないが、実際は当初と同じように簡単な指数関数方程式である。当初あった比例係数を具体的な物理パラメータに書き下したのでパラメータが多く見えている。例えば L は放射線の強さを表す指標の一つで、線エネルギー付与と呼ばれるものである。単位は $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ である。ソフトエラーに関しては $0.1\sim 100 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 程度の放射線を考えることが多い。 $100 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ の放射線がシリコンに飛び込むと、その軌跡に沿って $1 \text{ fC}/\text{nm}$ のノイズ電荷が発生する(式中の 0.01 はこの換算係数に由来する)。こうしてできたノイズ電荷がソフトエラーを起こす。本研究課題以前のみであれば、図1のようにいろいろな放射線(L)に対して実験をして検量線を求めておかなければいけなかったであろう。しかし、本研究課題で開発した数理モデル(方程式)には L が組み込まれており、図2グラフの横軸が示すように、放射線(L)が変わったらソフトエラー耐性(断面積)がどう変わるかわかる。このことは、コストの高い放射線試験の回数を減らすことに役立つであろう。また、最近のSRAMでは電源電圧 V_{DD} を動的に変えることがあり、変えたときのソフトエラー耐性も把握しておかなければならないことがある。従来であれば電源電圧 V_{DD} を変えて放射線試験をしなければいけないが、開発した数理モデル(方程式)を使えば、そのような場合の断面積を予測できるため、そうした放射線試験の回数を減らすことができるだろう(図2グラフの V_{DD} 依存性)。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

国内外における位置づけ

1. 数理モデル(方程式)を発表した論文は、その内容を発表した査読付き国際会議の受賞表彰委員によって最優秀論文賞候補にノミネートされ、本審査を経て受賞した。
2. 数理モデル(方程式)を最初に発表した論文(Aとする)、その後改良を発表した論文(B)、それに先だって発表した文献調査の論文(C)は、いずれも査読付き英文論文であり、掲載誌 IEEE Transactions on Nuclear Science の人気論文(月間ダウンロード数 TOP50)にランクインしている。具体的には、Aは発表から13カ月たっており、そのうち10回、Bは4カ月で3回、Cは29カ月で29回ランクインしている。

インパクト

1. 開発した数理モデル(方程式)では、全てのパラメータが物理的に意味づけされている。断面積を数式で表現する試みは過去にもあるが、それらには意味づけされていない合わせ込みのためのフリーパラメータが複数あった。一方、本研究課題で開発した方程式は、意味がわかっているので設計図などから読み取ることができる。従来に比べて予測する力が優れている。現状では放射線データを全く使わずに入力パラメータを全て決めてソフトエラー耐性(断面積)を予測するには至っていないが、パラメータの物理的な意味がわかっているため、放射線を使わない別の実験からパラメータを推定できる可能性に気づいた(次節参照)。
2. 異種構造の取扱いが可能になった。3節研究方法に書いたとおり当初は、設計や製造プロセスが異なる異種間の比較は目的から除外していた。しかし、本研究課題で開発した数理モデル(方程式)には、設計や製造プロセスのパラメータが組み込まれており、設計や製造プロセスの差を設計図から読み取れば、その差が断面積にどう影響するかわかるよ

うになった。実際に図 2 のグラフでは、製造プロセスが異なる 2 種類の SRAM のソフトエラー耐性を同じ式で説明している。

当初予期していないことが起きたことによる得られた知見など

当初は実験を想定していた。同じ製造プロセスによる SRAM を用意して、同種であるが製造工程に由来してソフトエラー耐性のばらつきがあるはずと考えて、それをデータ保持電圧 V_{DR} で検出することを目指した（同種間比較）。これは実現できなかったため、当初、描いたスクリーニングの実証には至っていない。しかし、本研究課題の前に発表した論文では、強制的に劣化させたチップを用意して劣化前のチップと比較し、劣化前後のソフトエラー耐性をデータ保持電圧変化 V_{DR} の検量線から求めることができていた。また、開発した数理モデル（方程式）には V_{DR} の特徴がそのまま引き継がれており、その数理モデル（方程式）は実験結果（文献値）をよく再現している。したがって、 V_{DR} を用いてスクリーニングできると我々は考えている。また、当初の目的を越えて異種構造の取扱いを実現した。そして、パラメーターの物理的な意味を考えて、放射線を当てずに放射線ソフトエラー耐性を予測する研究を着想した。この着想は科研費基盤（B）23H01478 の研究として採択された。

（次ページに続く）

図1 研究課題開始時

ソフトエラー耐性(断面積 [cm²])とデータ保持電圧 V_{DR} [V]の間に、次の指数関数特性を発見していた。

$$\sigma \propto \exp(kV_{DR})$$

図は、ある SRAM に放射線を当てて得た実験結果。1つのチップ上の 524 kb のメモリーセルそれぞれについてデータ保持電圧 V_{DR} を測定したのち 10mV 刻みで分類し、断面積 を整理した。このように発見した指数関数特性を検量線とすることを考えていた。

図は D. Kobayashi *et al.*, "Process variation aware analysis of SRAM SEU cross sections using data retention voltage," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 66, no. 1, pp. 155-162, Jan. 2019 を一部変えて転載 (©IEEE 2019)。

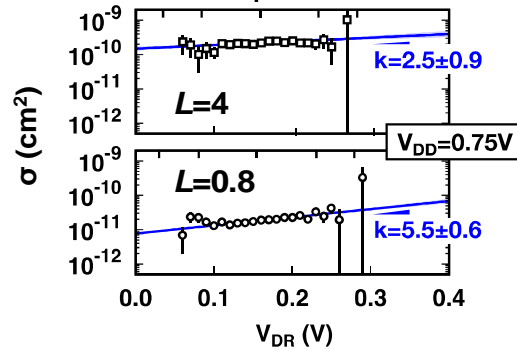
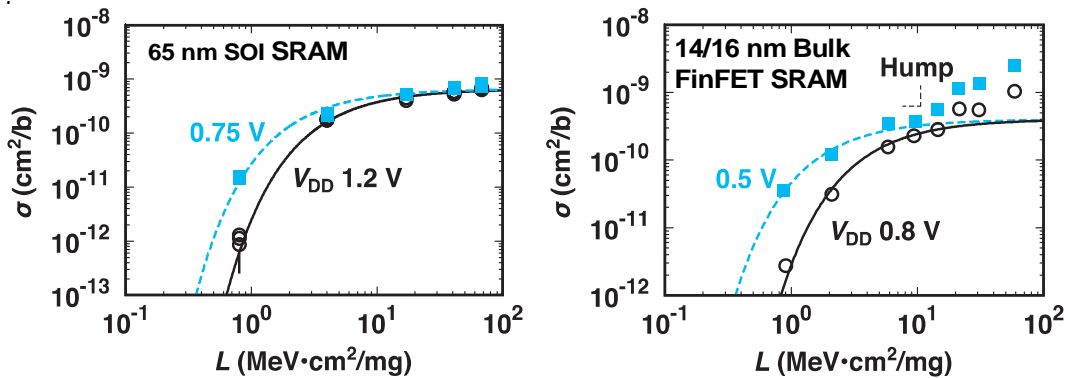


図2 研究課題終了時

次の方程式を開発した。 V_{DR} への対応はそのままに、 k などの比例係数がどう決まっているかを明らかにした。例えば、当初のアイデアでは検量線が放射線 (L) に依存していたため、さまざまな放射線 (L) に対して検量線を求めなければいけなかった。しかし、開発した方程式には L が組み込まれておりその必要はなくなった (グラフの横軸に着目されたい)。電源電圧 V_{DD} の変更に伴ってソフトエラー耐性 (断面積) がどう変わるかもわかるようになった (グラフの V_{DD} 依存性)。記号の詳しい意味については発表論文を参照されたい。なお、この資料では説明を簡単にするために発表した式から記号を少し変えてある。

$$\sigma = \frac{A}{2} \exp\left(-\frac{5\zeta C_L V_{DD} - V_{DR}}{\eta d} \frac{1}{0.01L}\right)$$



図は D. Kobayashi *et al.*, "An SRAM SEU cross section curve physics model," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 69, no. 3, pp. 232-240, Mar. 2022 よりクリエイティブコモンズライセンス CCBY4.0 の元転載。記号が実験結果で、線が方程式の結果。実験結果は次の論文から読み取った。(左) [65 nm SOI SRAM] D. Kobayashi *et al.*, "Data-retention-voltage-based analysis of systematic variations in SRAM SEU hardness: A possible solution to synergistic effects of TID," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 67, no. 1, pp. 328-335, Jan. 2020。(右) [14/16 nm Bulk FinFET SRAM] R. C. Harrington *et al.*, "Empirical modeling of FinFET SEU cross sections across supply voltage," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 66, no. 7, pp. 1427-1432, Jul. 2019。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 D. Kobayashi, K. Hirose, K. Sakamoto, Y. Tsuchiya, S. Okamoto, S. Baba, H. Shindou, O. Kawasaki, T. Makino, and T. Ohshima	4. 巻 69
2. 論文標題 An SRAM SEU cross section curve physics model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 232-240
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TNS.2021.3129185	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 D. Kobayashi	4. 巻 68
2. 論文標題 Scaling trends of digital single-event effects: A survey of SEU and SET parameters and comparison with transistor performance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 124-148
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TNS.2020.3044659	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 D. Kobayashi, M. Uematsu, and K. Hirose	4. 巻 70
2. 論文標題 Threshold and characteristic LETs in SRAM SEU cross section curves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 707-713
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TNS.2023.3244181	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 D. Kobayashi, K. Hirose, K. Sakamoto, Y. Tsuchiya, S. Okamoto, S. Baba, H. Shindou, O. Kawasaki, T. Makino, and T. Ohshima
2. 発表標題 An SRAM SEU cross section curve physics model
3. 学会等名 IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 出口拓実, 小林大輔, 廣瀬和之
2. 発表標題 二光子吸収過程パルスレーザを用いた重イオン誘起ノイズパルスの入射位置依存性の再現
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 唐木達矢, 小林大輔, 廣瀬和之
2. 発表標題 パルスレーザによる二光子吸収過程を利用した重イオン誘起SETパルス波形のエネルギー依存性の再現
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤 由高, 小林 大輔, 廣瀬 和之
2. 発表標題 バンド間トンネリングのソフトエラー信頼性予測への応用可能性
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daisuke Kobayashi and Kazuyuki Hirose
2. 発表標題 How harsh is space?---Equations that connect space and ground VLSI
3. 学会等名 Symposium on VLSI Technology and Circuits (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究の成果はIEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference Outstanding Conference Paper Awardを受賞した。以下の2本の受賞紹介記事がIEEE Transactions on Nuclear Scienceに掲載された。

IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 69, no. 3, pp. 201-202, Mar. 2022 (<https://doi.org/10.1109/TNS.2022.3156424>)

IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 69, no. 3, pp. 203-204, Mar. 2022 (<https://doi.org/10.1109/TNS.2022.3156022>)

本研究の成果は応用物理学会が発行する月刊誌「応用物理」に掲載された。

小林大輔、廣瀬和之「魔法のソフトウェア信頼性方程式を探して」応用物理 2023年92巻2号 pp. 89-93 (https://doi.org/10.11470/oubutsu.92.2_89)

本研究の一部は東京大学大学院工学系研究科修士課程の研究として実施し、3編の修士論文にまとめられた。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	牧野 高紘 (Makino Takahiro) (80549668)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 量子機能創製研究センター・主幹研究員 (82502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------