

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560435

研究課題名(和文)放射線による過渡的な局所昇温現象とそのソフトエラー耐性への影響

研究課題名(英文) Radiation-induced increase in local temperature and its effects on soft error tolerance

研究代表者

小林 大輔 (Kobayashi, Daisuke)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：90415894

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：放射線が原因となって起きる「ソフトエラー」と呼ばれる電子デバイスの誤動作現象を取り扱った。放射線がデバイスに侵入すると物質中に電子ならびに正孔が発生し、これがノイズとなってデバイスが誤動作する。その際に伴う物質の温度上昇の効果について検討した。熱注入を容易に取り扱うために、雰囲気温度制御モデルを考案した。200 nm SOI-CMOS回路技術を例に昇温現象の効果調べた所、この現象を取り入れることでノイズが大きくなることがわかった。すなわち、この現象を取り入れていない見積りは、回路のソフトエラー耐性を実際より高く評価している可能性がある。ただし、その差は10%程度に留まることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：A radiation strike may lead to a malfunction of semiconductor devices. It is often called "soft error", which is triggered by the carriers such as electrons and holes generated in the struck materials. The struck of radiation may also deposit the thermal energy. It increases the local temperature of the struck materials. This temperature increase is studied with the technology of numerical device simulation in conjunction with a newly developed model: an ambient-temperature control model. An analysis with an circuit example in a 200-nm SOI-CMOS technology reveals that the local temperature increase leads to the enlargement of the noise signal. This indicates that the circuit soft-error tolerance estimated without the temperature increase may be higher than it really is. It is, nonetheless, demonstrated that the difference is small, less than 10%.

研究分野：電子デバイスの信頼性

キーワード：電子デバイス・機器 放射線 ソフトエラー 熱

1. 研究開始当初の背景

(1) ソフトエラーへの懸念

ソフトエラーとは放射線によって引き起こされる半導体デバイスの一時的な誤動作である。放射線が半導体デバイスに侵入すると、その電離作用によって電荷(電子・正孔)が発生し、これがノイズとなってデバイスが誤動作する。微細化によるノイズマージン低下の結果、これまで問題にならなかった小さなノイズでもソフトエラーが起こるようになってきた。今日に至っては、厳しい放射線環境に晒される宇宙用途は元より地上用途であっても、この現象がもたらす影響の評価・対策が欠かせない [1-3]。

(2) 過渡的で局所的な昇温効果への懸念

放射線が電子デバイスを通じた際、エネルギーの大半は電離を介して素子に与えられる。励起された電子のエネルギーの一部はフォノン散乱により格子へと輸送され、温度上昇をもたらす。これは空間的にも時間的にも局在した熱注入と見なすことができるが、この熱注入に伴うデバイスの過渡的で局所的な昇温現象がソフトエラー耐性に及ぼす影響は議論されていない。事実、半導体デバイスシミュレータを用いた放射線効果の議論は広くなされているものの、この昇温現象はモデルとして取り込まれていない。その効果を検討し明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

放射線による過渡的な局所昇温現象がソフトエラー耐性に与える影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 想定事例

研究を進めるに当たり、事例を図1の様に想定した。半導体デバイスとして、CMOS論理回路の基本であるNOTゲートを想定した。入力が接地されて論理0になっておりNMOSはオフ状態とする。このNMOSに放射線が当たった場合を考える。出力は電源電圧で一定のはずだが、放射線によるノイズ電荷が収集されることで、電圧が一時的に低下する。このノイズパルスをSET (Single Event Transient) パルスと呼ぶ。ソフトエラーには幾つかの種類が存在するが、突き詰めればSETパルスが起源であるものが多い。

SETパルスの時間幅は、デバイスが異常状態にある期間を差す。ソフトエラーが起きる頻度、すなわち耐性は、このパラメータに一般的には比例する。そこで、本研究では、この時間幅が、局所的な昇温効果の有無によってどう変わるか調べた。

デバイスの製造プロセスとしては、CMOS技術のうちSOI技術を想定した。SOI技術は耐放射線性に優れた回路を実現するのにしばしば使われている。一方で、この技術で作られた素子は、素子が熱伝導性の悪い絶縁体で覆われるため、昇温現象の効果が他の技術

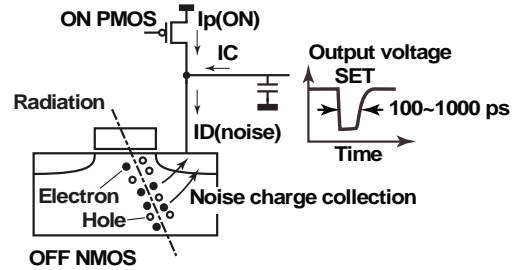


図1: 想定事例. 入力0のNOTゲートを想定し、オフ状態のNMOSに放射線が当たった場合を考える。出力は電源電圧で一定のはずだが、放射線によるノイズ電荷が収集されることで、電圧が一時的に低下する。このスパイクノイズをSETパルスと呼ぶ。

(バルク技術)に比べて顕著に出ると予想される。

入射する放射線としては、線に代表される重イオンを想定した。地上環境においては中性子を考慮する必要があるが、その場合もソフトエラーを引き起こす本質的な要因は、中性子とシリコンの核反応によって生成される重イオンにある。重イオンの効果を明らかにできれば、その手法を地上環境にも応用できると考えた。

(2) 手法

近年の半導体デバイスシミュレータでは、昇温現象は取り込まれてはいないが、放射線によるノイズ電荷の発生を模擬してSETパルスを計算できるものが多い。また、ハイドロダイナミックモデルやエネルギーバランスモデルなどと呼ばれる熱輸送モデルを用いて、熱の輸送を取り扱えるものも多い。そこで、ここに放射線がもたらす熱注入を取り込めば良いと考えた。すなわち、重イオン放射線が貫通した直後のデバイスの温度分布を求め、それを半導体デバイスシミュレータに初期条件として与えて、熱輸送モデルと連結したSETシミュレーションを行えば良い。この方法を検討していったところ、重イオンが作る時空間的に局在化した温度分布をそのまま現在のデバイスシミュレータに初期条件として与えるのは困難が伴うことがわかった。そこで、後述する雰囲気温度制御モデルを着想し、これを用いて昇温効果を議論した。

4. 研究の成果

(1) 雰囲気温度制御モデルによる推定

方針

我々は、2008年から2009年にかけて実施した文部科学省 科学研究費補助金(若手(B)) 課題番号 20760228 の研究において、SOI-CMOS回路におけるSETパルスの時間幅は、発生したノイズ電荷の放出過程に強く依存している事を明らかにした(例えば文献

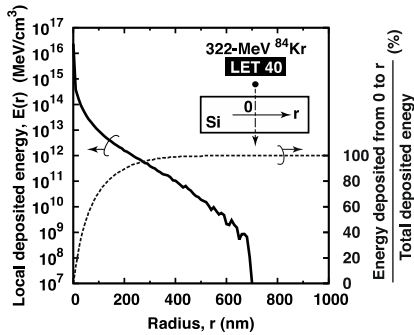


図 2: エネルギー付与の空間分布 (動径方向). LET 40 MeV·cm²/mg を持つ 322-MeV ⁸⁴Kr が Si 薄膜に照射した場合を PHITS コードで計算した. なお, ここで用いた LET = 40 の値は宇宙放射線を議論するのにしばしば使われる値である.

[4]). これは主に拡散現象で決まっており, 拡散が妨げられると時間幅が長くなる. 一般に, 半導体デバイスでは温度が上昇するとフォノン散乱によって拡散が妨げられるようになる. したがって, 温度上昇を実際より高めに導入することは, SET パルスを長めに推定ことになる. SET パルス幅の長さ に比例して, ソフトエラーが起きやすくなるので, その時間幅を長めに推定することは, デバイスの信頼性の観点では悲観的に推定することを意味する. この性質に着目して, 本研究では, できるだけ悲観的な推定となるように仮定をおきながら計算を簡略化する方針を採用した.

モデル化

想定した SOI-CMOS 素子の具体的な大きさなどを決めるために, 素子は文献[5]にあるような 200 nm 完全空乏型 SOI-CMOS 技術によるものとした. この技術の素子では, チャネル Si 領域 (ボディ領域) が主に放射線に反応する領域 (SV) であることが知られている. これを厚さ $t_{\text{SOI}} = 50 \text{ nm}$ で, 長さ $L = 200 \text{ nm}$, 幅 $W = 200 \text{ nm}$ の SOI 薄膜とする. この中央に, ある LET (Linear Energy Transfer) [MeV·cm²/mg] の線エネルギー付与を持つ放射線が垂直に入射したとする.

LET は放射線が電離を介して固体に付与する単位長さ当たりのエネルギーである. 50 nm 程度の薄膜であれば軌跡方向の LET の変化は無視できる. そのため付与するエネルギー E は, $E = \rho \text{ LET } t_{\text{SOI}}$ と書ける. ここで ρ は Si の密度である. 動径方向について LET は情報を与えないので PhiTs コード[6]で検討した. 図 2 に結果を示す. LET は宇宙放射線の効果を議論するのにしばしば使われる 40 MeV·cm²/mg とした. 200 nm 程度の広さがあればエネルギーの大半がその領域に付与されることがわかる ($r = 100 \text{ nm}$ で 7 割). そこで, 悲観的な推定となるように, 動径方向のエネルギーのはみ出しはなくエネルギー E が全て SV に付与されるとした. そして,

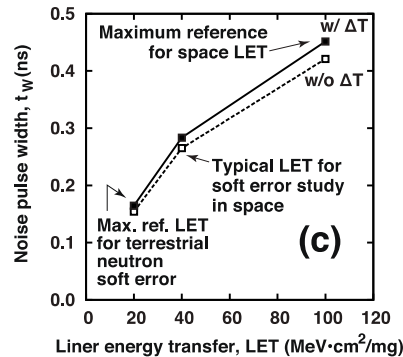
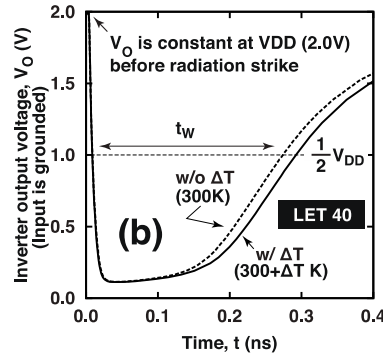
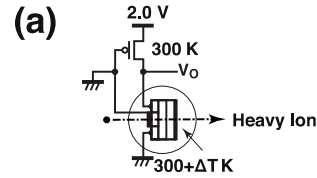


図 3: 昇温現象の効果. (a) 雰囲気温度制御モデルの実装例. (b) 昇温現象がもたらす SET パルスの変化. (c) LET 依存性.

計算を簡略化するために, E は SV に一様分布すると仮定する [仮定(*)]. なお, ここで用いた「全ての E が SV に一様分布する」という考え方は, 類似例が文献[7]に認められる. 更に, E の全てが温度上昇 T に寄与したと考えると, 当該 SV の体積 (LWt_{SOI}) と比熱 c を用いて

$$T = E / \rho c L W t_{\text{SOI}} \quad [\text{K}] \quad \dots \text{(式 1)}$$

と記述できる.

次に, SV が酸化膜に囲まれていることや Si 薄膜における熱伝導率の急激な減少[8]を考慮して放熱を無視した. これにより, 図 3(a) の様に, 放射線が当たった素子の雰囲気温度を T だけ上昇させて, それを維持したシミュレーションを行えばよい. これは既存の半導体デバイスシミュレーションに容易に実装できる. 時空間での温度変化を無視したことで, 計算が簡便になっている. 更に, 温度上昇を式 1 で解析的に与えた事から素子サイズ依存性なども議論しやすい.

過渡的な局所昇温現象がソフトエラー耐性に与える影響

図 3(b,c) は提案したモデルを用いた半導体デ

バイスシミュレーションの結果である。なお、二次元シミュレーションの結果であるため t_w の絶対値については議論しない方が良いが、相対的には良いと考えて以下議論する。

図 3(b) は LET 40 MeV \cdot cm²/mg の場合の結果である。NOT ゲートの出力電圧 V_0 の時間発展を示している。本来 VDD (2.0 V) で一定のはずであるが、放射線によって変化する様子が見てとれる。パルス状のノイズでありこれが SET パルスである。昇温現象の導入によりこの変化は大きくなることが確認できる。時間幅 t_w に着目すると長くなることが認められる。図 3(c) は t_w の LET 依存性を示す。昇温現象の効果は LET が大きいほど顕著で最大で 10% 程度であることがわかった。ソフトエラー耐性は t_w に比例して低下することと合わせると、昇温現象を取り入れていない現在のシミュレーションは 10% 程度楽観的な結果を与えていることが示唆された。

解析的に解く可能性

SOI-CMOS 回路における t_w は拡散過程によって支配されている。そこで拡散過程だけで単純に現象を記述できると仮定すると、 t_w は拡散係数 D に反比例すると言える。文献[9]より、拡散係数 D は p 型半導体の場合 $T^{-2.2}$ の依存性を示す。そこで式 1 で求めた T とを合わせると、LET 40 MeV \cdot cm²/mg の場合、 t_w は 15% 程度伸びると見積ることができた。これは半導体デバイスシミュレーションの結果とほぼ一致しており、数値計算技術によらずとも解析的に見積ることができる可能性が示唆された。この方法がどのような場合に使えるか明らかにすることが今後の課題として残された。

(2) 提案手法の適用可能性

前節で提案した手法では、[仮定(*)]の通りエネルギー E が SV に一様分布すると仮定している。実際の熱注入が時空間で局在しているのに対し、提案モデル(「一様モデル」とする)ではこれを均している。この点について詳しく検討した。

放射線による温度上昇を拡散方程式に由来するガウス型モデルとして記述する方法がある[10]。このガウス型モデルと我々の一様モデルを比較した。計算体系は前節と同じである。ただし、ガウス型モデルの計算では Si 薄膜の幅 W と長さ L は無限と仮定した。

二つのモデルで温度分布を推定して比較した結果を図 4 に示す。ガウス型モデルには、初期の幅 r_0 として 50 nm [11] を用い、熱伝導率 λ として 0.55 W/cm \cdot K [8] を用いた。図より 100 ps より前では一様モデルによる温度推定が下回る。この場合、悲観的な推定を与えたとは単純に言えない。SET パルスの時パラメータと合わせて検討する必要があることがわかった。これは複雑であり、見通しよく説明できる方法の作成が今後の課題とし

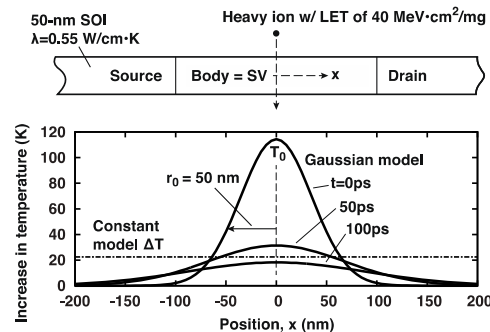


図 4：放射線による局所昇温現象。ガウス型モデルと一様モデルでの比較。LET 40 MeV \cdot cm²/mg の場合

て残された。一例として、ここでは次の様に考えた。ガウス型モデルは空間的に裾を引くが、簡単のためにピーク温度だけに注目する。このピーク温度は時々刻々と減少する。前節(1) に示した通り、各時刻における拡散係数をこの温度から求めることができる。図 3(b) に示した通り t_w は 300ps 程度であるので、この期間の実効的な拡散係数を数値積分の手法で求め、前節(1) に示した方法で t_w の変化を見積ると 12% という結果を得た。これは前節(1) の結果と一致しており、そこで得られた一様モデルの推定は悲観的であると言ってよさそうである。

式 1 のような解析式を得たという利点を活かして、我々の一様な推定が悲観的であると簡単に言い切れる範囲を検討した。ガウス型モデルにおいて初期ピーク温度を T_0 とする。

$T \geq T_0$ が成立する場合、我々のモデルは温度を常に高めに与えたことになり、悲観的な見積りを保証する。 T_0 は $E/\pi r_0^2 \lambda n^2 t_{SOI}$ と記述でき、式 1 と比較して $LW \leq \pi r_0^2$ を得る。したがって、おおよそ $L(=W) \sim r_0$ となる系においては、提案手法が悲観的な見積りを与えると言って良いことがわかった。

<引用文献>

- [1] 堀切「ソフトエラー対策、待ったなし SRAM や論理回路が狙上に」『日経エレクトロニクス』 pp.63-70, 2005 年 7 月。
- [2] 戸坂「知っておきたいソフト・エラーの実態 歴史と評価方法、対策まで」『日経エレクトロニクス』 pp. 145-156, 2005 年 7 月。
- [3] M. Santarini, "Cosmic radiation comes to ASIC and SOC design," in *EDN*, pp. 46-56, May 2005.
- [4] D. Kobayashi, K. Hirose, V. Ferlet-Cavrois, D. McMorrow, T. Makino, H. Ikeda, Y. Arai and M. Ohno, "Device-Physics-Based Analytical Model for Single-Event Transients in SOI CMOS Logic," *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56**, pp. 3043-3049, 2009.

- [5] 廣瀬和之, 小林大輔「宇宙で活躍する半導体デバイス」応用物理 **83**(8), 8 月, pp. 655-659, 2014.
- [6] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto *et al.*, "Particle and Heavy Ion Transport Code System, PHITS, Version 2.52," *J. Nucl. Sci. Technol.* **50** pp. 913-923, 2013.
- [7] N.Z. Butt and M. Alam, "Modeling Single Event Upsets in Floating Gate Memory Cells," in *Proc. IEEE Int. Reliability Physics Symp. (IRPS)*, 2008, p. 547.
- [8] 内田健「シリコンナノ構造デバイスのキャリア輸送特性と熱配慮設計」応用物理 **83**(4), pp. 262-267, 2014.
- [9] S.M. Sze and K.K. Ng, "Physics of Semiconductor Devices," (John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2007).
- [10] A.D. Touboul, A. Carvalho, M. Marinoni, F. Saigne, J. Bonnet and J. Gasiot, "Structural defects in SiO₂-Si caused by ion bombardment", in *Defects in Microelectronic Materials and Devices*, Ed. by D.M. Fleetwood, S.T. Pantelides and R.D. Schrimpf, (CRC Press, 2009) Chap. 18 p. 533.
- [11] P. Oldiges, R. Dennard, D. Heidel, B. Klaasen, F. Assaderaghi and M. Jeong, "Theoretical Determination of the Temporal and Spatial Structure of α -Particle Induced Electron-Hole Pair Generation in Silicon," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **47**(6), pp. 2575-2579, 2000.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計2件)

小林大輔, 伊藤大智, 廣瀬和之「放射線による局所昇温現象を考慮したソフトエラーシミュレーションの適用可能性」第62回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市). 2015年3月11日-14日, 12p-A27-12.

小林大輔, 伊藤大智, 廣瀬和之「放射線による局所昇温現象を考慮したソフトエラーシミュレーション」第75回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス(北海道札幌市). 2014年9月17日-20日, 19p-A15-12.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 大輔 (KOBAYASHI, Daisuke)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号: 90415894

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

廣瀬 和之 (HIROSE, Kazuyuki)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号: 00280553