宇宙機用集積回路に適した薄膜 BOX FDSOI プロセスで試作した リングオシレータのトータルドーズ効果の実測評価

吉田 高士[†] 古田 潤[†] 小林 和淑[†]

† 京都工芸繊維大学 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎橋上町 E-mail: †tyoshida@vlsi.es.kit.ac.jp, ††{furuta,kazutoshi.kobayashi}@kit.ac.jp

あらまし 宇宙で用いられる機器には半導体を用いた集積回路が必要不可欠であるが,宇宙空間で長期運用が求めら れる半導体デバイスでは宇宙放射線によるトータルドーズ効果 (TID) が問題となる. FDSOI プロセスは放射線による 一時的な故障であるソフトエラーに強い一方, BOX 層を有するために TID に対して脆弱になる.本稿ではγ線の照射 実験を行い,リングオシレータ (RO)の発振周波数の変化を調べることで 65 nm 薄膜 FDSOI プロセスの TID 耐性を評 価した.γ線照射の代替として,簡易的に行えるα線照射による TID の評価手法について提案する. キーワード 宇宙機,トータルドーズ効果,FDSOI,リングオシレータ,γ線,α線

Measurement Results of Total Ionizing Dose Effect on Ring Oscillators Fabricated by a Thin-BOX FDSOI Process for Outer-space Mission

Takashi YOSHIDA^{\dagger}, Jun FURUTA^{\dagger}, and Kazutoshi KOBAYASHI^{\dagger}

† Kyoto Institute of Technology, Kyoto, Japan

E-mail: †tyoshida@vlsi.es.kit.ac.jp, ††{furuta,kazutoshi.kobayashi}@kit.ac.jp

Abstract The Total Ionizing Dose (TID) effect is one of the major concerns for semiconductor devices in outer space, where high and low energy particles penetrate to space crafts. The Fully-Depleted Silicon On Insulator (FDSOI) process has brought a significant improvement of electronic devices resilient to soft errors that are major reliability concerns for semiconductor devices in outer space. However, due to the buried oxide (BOX) layer, it becomes more sensitive to TID than a conventional planer bulk process. In this paper, we evaluate TID tolerance of 65 nm thin BOX FDSOI process by measuring Ring Ocillator (RO) frequecy. By comparing the irradiation of α ray and γ ray, it was shown that α ray irradiation that can be done in a laboratory can be used instead of γ ray irradiation that must be done under a secured measurement facility. **Key words** Space Craft, Total Ionizing Dose Effect, FDSOI, Ring Oscillator, Gamma-ray, Alpha-ray,

1. 序 論

NASA は 2019 年,火星到達を視野に入れた月面着陸計画で あるアルテミス計画を発表したが,日本でも JAXA が月面で 1 万 km 以上走行が可能となる有人与圧ローバーについて研究を 進めるなど,国内外問わず宇宙開発が加速している [1],[2].宇 宙開発のためのロケットや宇宙船,基地などにも集積回路は必 要不可欠である.宇宙機は一度宇宙空間にでると修理やメンテ ナンスが困難であり,一つの誤動作や故障がシステム全体に影 響を与え重大な事故につながるため,高い信頼性が求められる. しかし,集積回路を主とする半導体は宇宙放射線に曝されるこ とにより誤動作や故障,特性の劣化が引き起こされることが知 られている.そのため宇宙機に用いられる集積回路は放射線耐 性を十分に保障する必要がある. 放射線が半導体に与える主な影響として,電離作用が挙げら れる.電離作用とは,放射線が物質中を通過、衝突する際に放 射線が持つエネルギーにより原子が持つ軌道電子がはじき出さ れることで電子正孔対が発生する作用である.この電子正孔対 が集積回路に及ぼす影響はシングルイベント効果 (SEE: Single Event Effect) とトータルドーズ効果 (TID: Total Ionizing Dose effect) に分類される.SEE は 1 つの放射線粒子が集積回路に突 入することにより発生する故障のことを指しており,ラッチの 保持値が反転するソフトエラーや,放射線起因の大電流による ラッチアップなどが含まれる [3],[4].

一方で TID は集積回路が長期間にわたって継続的に放射線 を受けることにより発生する蓄積的な劣化現象である.図1に MOS トランジスタにおける TID の発生機構を示す [5].放射線 による電離作用でトランジスタの酸化膜内に発生した電子正孔



図 2 TID によるしきい値シフト[6]

対のうち,正孔がデバイスの酸化膜内の欠陥や界面準位にト ラップされ,その正孔によりリーク電流の増加やしきい値変動 が生じる.図2に示すようにTIDではnMOSのしきい値は減 少,pMOSのしきい値は増加する[6].再起動により回復が可能 なソフトエラーとは異なり,TIDは蓄積的な劣化であるため, 長期運用が想定される宇宙機ではこの効果に対する耐性が求め られる.デバイスのプロセスによりTIDの耐性も変化するた め,それぞれのプロセスにおける耐性の評価が必要である.

本稿では,集積回路に放射線を照射し,搭載されたリングオ シレータ (RO)の発振周波数の変化を調べることで TID による しきい値変動を評価する.異なる構成の RO の発振周波数の比 較から薄膜 FDSOI プロセスの TID 耐性を調べる. α線を用い た TID の簡易的な評価手法についても提案する.

本稿の構成を述べる. 第2節では bulk プロセスと薄膜 FDSOI の比較を行う. 第3節では nMOS と pMOS の影響を分離した RO を用いた評価結果を示し, さらに放射線照射時のバイアス 印加の影響についても実測結果から述べる. 第4節では NAND 型, NOR 型, INV 型の3種類の RO の TID 耐性を実測結果か ら比較する. 第5節では α線を用いた TID の評価手法の有用性 と既存手法である γ線照射との違いを説明する. 第6節でまと める.

2. bulk 構造と FDSOI 構造における TID

本章では bulk 構造と SOI 構造における TID の違いについて 述べ, RO を用いた実測結果を示す.

2.1 bulk 構造

bulk 構造とは標準的な CMOS トランジスタ構造である.この bulk 構造において,100 nm 以上のプロセスでは TID の主な



図3 薄膜 FDSOI 構造の断面図

原因はゲート酸化膜に蓄積する正孔である.しかし,スケーリ ングによりプロセスノードが小さくなるにつれてゲート酸化膜 が薄膜化し,ゲート酸化膜内の正孔の影響は無視できるほど小 さくなった.一方で素子分離 (STI: Shallow Trench Isolation)の SiO₂ における正孔の蓄積の影響が顕在化している [7], [8].

2.2 SOI 構造

bulk 構造に対して,シリコン基板とトランジスタの間に絶 縁層として埋め込み酸化層 (BOX 層)を挿入した構造を SOI (Silicon On Insulator)構造と呼ぶ. SOI 構造は BOX 層を挿入す ることでトランジスタの寄生容量を小さくすることができ,高 速動作,低電圧での動作が可能であり,BOX 層の電子正孔対の 遮蔽効果によりソフトエラー耐性が大幅に向上することが知ら れている[9].しかし,BOX 層はゲート酸化膜よりもはるかに 厚く,そこに蓄積する正孔の影響が大きくなるため,SOI 構造 は bulk 構造に比べて TID 耐性が低くなる [10]~[12].本稿では SOI 構造の中でも図 3 に示すような完全空乏型である 65 nm 薄 膜 FDSOI (Fully Depleted SOI)構造を用いて実測を行う.BOX 層の厚さが 15 nm と従来の FDSOI プロセスに比べて非常に薄 く BOX 層を通じて基板バイアスを制御することができる.

2.3 実測による比較

上記 2 つの構造の TID 耐性を放射線照射実験による実測結 果から比較する. bulk, FDSOI ともに 65 nm のプロセスノード で,回路構造も全く同じチップに対し,⁶⁰Co を線源とするγ 線 (線量率:129 rad/s)の照射を行い,チップに搭載されている RO の発振周波数の変化を測定する. RO は図 4 に示すように CMOS 構造のインバータ6つ,イネーブル信号入力用に CMOS 構造の NAND が 1 つが連なった 7 段 RO となっている.

図 5 に RO の発振周波数の変化の実測結果を示す. 横軸は吸 収線量,縦軸は発振周波数を表しており,照射前の発振周波 数で正規化している. 吸収線量 1.4 Mrad の時点で bulk チップ の RO は発振周波数が 1.1% 増加,薄膜 FDSOI チップの RO は 10.1% 減少した. この結果から, BOX 層が薄くても, FDSOI 構造は bulk 構造に比べて TID に対して脆弱であることが分か る. 図 2 で示した通り, TID により nMOS はしきい値が減少, pMOS はしきい値が増加するが, RO の場合,しきい値の減少 は発振周波数を増加させ,しきい値の増加は発振周波数を減少 させる. bulk 構造では発振周波数が増加したが,これは nMOS のしきい減少の影響が pMOS のしきい値増加の影響よりも大き かったことが原因として考えられる.



図 5 bulk 構造と FDSOI における TID による RO の発振周波数の変化

0.6

0.8

Total dose [Mrad]

1.2

1.4

0.85

0

0.2

0.4

nMOS と pMOS の影響を分離した RO による 比較

前節で述べたように, TID による nMOS のしきい値減少は発振周波数は減少させ, pMOS のしきい値増加は発振周波数を増加させる. 図4のような CMOS インバータを用いた RO では nMOS と pMOS の両者の影響が混在するため, それぞれのしきい値変化量を調べることができない.

TID により nMOS と pMOS のしきい値がそれぞれどの程度 変動するかを調べるため,図6に示すような nMOS と pMOS の影響を分離した RO を用いる.図6の(a) は nMOS と抵抗 のみ,(b) は pMOS と抵抗のみで構成されている.以降は(a) を nMOS RO,(b) を pMOS RO と呼ぶ.この RO が搭載された チップ(第2節と同様に65 nm 薄膜 FDSOI プロセスで試作)に 60 Co を線源とする線量率129 rad/sのγ線を照射する.さらに 電源電圧の TID への影響を調べるため,照射時に RO の発振時 以外は電源電圧(VDD)を0V する場合と,VDD に常に1.2 V のバイアスを加え続ける場合の2条件で測定を行う.

測定結果を図 7 に示す. RO の発振時以外 0 V とした場合, 吸収線量 3 Mrad の時点で nMOS RO は発振周波数が 28.6% 増 加, pMOS RO は 23.5% 減少した. 常に 1.2 V とした場合, 吸収 線量 3 Mrad の時点で nMOS RO は 52.7% 増加, pMOS RO は 31.5% 減少した.

この結果から TID によるしきい値変動を求める. SPICE シ ミュレーションでしきい値をパラメータスイープした時の発 振周波数の変化を調べ,そのデータから実測でのしきい値変 動を算出する.算出したしきい値変動の絶対値を図 8 に示す. VDD を 0 V とした条件では吸収線量 3 Mrad の時点で,nMOS は 130 mV, pMOS は 164 mV しきい値が変動している. VDD を 1.2 V とした条件では nMOS は 220 mV, pMOS は 223 mV



(a) nMOS と抵抗のみを用いた RO (b) pMOS と抵抗のみを用いた RO

図 6 nMOS と pMOS の影響を分離した RO の回路図



図7 nMOS RO と pMOS RO の発振周波数の変化の比較



図8 実測結果と SPICE シミュレーションから算出した TID によるし きい値シフト

シフトしている.いずれの場合も変化は飽和していく傾向があ る.nMOS,pMOSともに照射中に電圧バイアスを加え続けて いるとしきい値変動が大きくなることがわかる.この原因につ いて考える.図1で示したように放射線の電離作用により電子 正孔対が発生する.発生した電子正孔対のうち,電子は有効質 量が小さいために正孔よりも比較的速く酸化膜内から排出され る.その際電子の一部は正孔と再結合して消滅する.再結合せ ず残った正孔が欠陥や界面準位にトラップされる.再結合せ ず残った正孔が欠陥や界面準位にトラップされる.再結合本が 低いとトラップされる正孔の数が増える.論理ゲートに電圧を 印加した場合,バンド構造の傾きが大きくなるため,発生した 電子がより速く排出されるため,正孔との再結合本が下がる. 結果としてトラップされる正孔が増え,TIDによるしきい値変 動が大きくなると考えられる.

4. NAND型, NOR型, INV型ROの比較

前節では nMOS や pMOS がそれぞれどのようなしきい値変化



0.9

0.85

0.8

0.75

NOR

NAND

INV

- 15.1%

22.5%



測定結果を図 10 に示す. 2.5 Mrad の時点で NAND 型 RO の 発振周波数は 8.9% 減少, NOR 型 RO は 22.5% 減少, INV 型 ROは15.1%減少した.第2節でも示した結果と同様,65 nm 薄膜 FDSOI プロセスにおいて, CMOS インバータを用いた RO は TID により発振周波数が減少した.発振周波数が減少してい るということは、インバータ型 RO において pMOS のしきい値 増加が nMOS のしきい値減少よりも発振周波数により大きい影 響を与えることが分かる.

一方 NAND 型 RO はインバータ型 RO に比べて発振周波数 の減少量が少ない. しきい値の変動はトランジスタのオン抵 抗の変化と考えることができ、これが発振周波数を左右してい る. NAND では nMOS 2 つが直列になっているため nMOS 1 つの場合に比べてしきい値減少によるオン抵抗の減少が倍にな る. 一方 pMOS は並列となっているため、しきい値増加によ るオン抵抗の増加は pMOS 1 つの場合と変わらない. そのため nMOS が発振周波数を増加させる効果がインバータ型 RO に比 べて大きくなり、結果として発振周波数の減少が小さくなると 考えられる. NOR 型 RO についても同様である. NOR 型では pMOS が直列, nMOS が並列となるため pMOS のしきい値増加 によるオン抵抗の増加が倍となることでインバータ型 RO より も発振周波数の減少が大きくなる.



図 11 α線源を用いた LSI へのα線照射

α線照射とγ線照射の比較 5.

宇宙空間一般においては太陽からの陽子線による TID が支 配的である. 地球の磁場が及ぶ範囲であるヴァンアレン帯に おいては電子線が多量に存在するためこれも TID に寄与する. 電子線が IC 等のシールドに入射した際の制動 X 線も TID に寄 与する.そのため TID の実測評価には陽子線や電子線の評価が 適していると考えられるが,加速器が必要のため照射コストの 観点からγ線,もしくは X 線が一般的に用いられる [13], [14]. しかし,比較的コストが低いとはいえγ線やX線の照射には照 射施設が必要であり、照射室内での照射に限られ、時間的な制 約も伴う.測定器も TID の影響を受けてしまうため大型の LSI テスタ等を用いて動作を行いながらの照射も困難である. そこ で本章ではα線を用いた簡易的な TID の測定手法を提案する.

α線は図 11 に示すよう形で LSI への照射が行える. α線は 宇宙空間において TID に寄与する可能性が低い点や、線源から の距離依存性が高く、線量率に誤差が出やすいという点がデメ リットとして挙げられるが、一方で照射施設を必要としないた め、LSI テスタを用いて動作させながらの照射が可能あり、時 間的制約もない. そのため大まかな TID への耐性や変化の特 性を調べる際の簡易的な照射実験として有効であると考える. ²⁴¹Am を線源とした 3 MBq(線量率:12 rad/s) の α 線源を用いた 照射を行い, γ線と比較することでα線の有用性を調べた.

図 12 に第3節でも使用した nMOS RO と pMOS RO のγ線と α線の照射による発振周波数の変化の実測結果を示す. nMOS RO の発振周波数が増加, pMOS RO の発振周波数が減少する傾 向はγ線とα線ともに同様だが、吸収線量に対する変化の割合 はα線がγ線の1/4程度小さくなることが分かる.第4節で用 いた3種類のROに対しても同様のα線の照射を行った.結果 は図13のようになり、変化の傾向はγ線を照射した場合と一 致したが,吸収線量当たりの変化量に違いは生じた.

吸収線量当たりの変化量に違いが生じた原因は、γ線とα線 の LET(Linear Energy Transfer) の違いだと考えられる. LET と は放射線が単位長さあたりに平均して失うエネルギーのことを 指す. γ 線は低 LET 線, α 線は高 LET 線に分類される. LET が高いと, 電離作用により発生する電子正孔対の密度が高くな る. 発生密度が高くなると,再結合率が高くなる.再結合率 が高くなるとトラップされる正孔が減少するため, TID による





図 13 α線によるインバータ型 RO, NAND 型 RO, NOR 型 RO の発 振周波数の変化

変化が小さくなる [6]. このため, α線を TID の測定のための 照射に用いる場合は吸収線量に対する変化量の違いを考慮して 校正する必要がある.しかし,変化のおおまかな傾向は調べる ことができるため, 簡易的な手法としては有用であると考えら れる.

6. 結 論

放射線照射による RO の発振周波数の変化の実測結果から 65 nm 薄膜 FDSOI プロセスの TID 耐性を評価した. bulk と薄膜 FDSOI プロセスの比較から,薄膜 FDSOI プロセスの TID に対 する脆弱性を明らかにした. nMOS と pMOS の影響を分離した RO を用いた実測結果からは、3 Mrad のγ線照射により nMOS は 130 mV しきい値が減少, pMOS は 164 mV しきい値が増加す ることが分かった.照射中に電源電圧 1.2V を加え続けた場合, 0Vとした場合よりもしきい値の変化量が大きくなり, nMOS は 220 mV 増加, pMOS は 223 mV 減少した. これは電離作用に より発生した電子正孔対の再結合率が電圧バイアスにより低く なることで、トラップされる正孔が増えることが原因と考えら れる.3 種類の RO を用いた評価では, 2.5 Mrad のγ線の照射 により発振周波数が NAND 型 RO では 7.4% 減少, NOR 型 RO では 21.8% 減少, インバータ型 RO では 14.5% 減少した. こ の違いは nMOS と pMOS がそれぞれ直列になっているか並列 になっているかに起因している. γ線照射とα線照射の比較か ら,吸収線量当たりの変化の大きさには違いがあるが,変化の 傾向は一致することが分かった. 簡易的な手法としてα線照射 が TID 耐性の評価に有用であることを示した.

文

- NASA, "Nasa publishes artemis plan to land first woman, next man on moon in 2024," Sept. 22, 2020. https://www.nasa.gov/pressrelease/nasa-publishes-artemis-plan-to-land-first-woman-next-man-onmoon-in-2024/.
- [2] JAXA, "Jaxa とトヨタ、国際宇宙探査ミッションへの挑戦に合意-将来の月面でのモビリティ実現を目指して-," Mar. 12, 2019. https://www.jaxa.jp/press/2019/03/20190312a_j.html.
- [3] 戸坂義春, "知っておきたいソフト・エラーの実態," 日経エレクトロニクス, 2005 年 7 月 24 日号, pp.145–156, 2005.
- [4] M. Jiang, G. Fu, B. Wan, M. Jia, and Y. Qiu, "Research on single event latch-up effect of cmos based on tcad," 2017 Second International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE), pp.1–5, 2017.
- [5] F.B. McLean and T.R. Oldham, "Basic mechanisms of radiation effects in electronic materials and devicesd," Harry Diamond Lab. Tech. Rep., vol.HDL-TR, p.2129, Sept. 1987.
- [6] H.J. Barnaby, "Total-ionizing-dose effects in modern cmos technologies," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.53, no.6, pp.3103– 3121, Dec. 2006.
- [7] R.M. Chen, Z.J. Diggins, N.N. Mahatme, L. Wang, E.X. Zhang, Y.P. Chen, Y.N. Liu, B. Narasimham, A.F. Witulski, B.L. Bhuva, and D.M. Fleetwood, "Effects of total-ionizing-dose irradiation on seu- and set-induced soft errors in bulk 40-nm sequential circuits," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.64, no.1, pp.471–476, Jan. 2017.
- [8] F. Faccio and G. Cervelli, "Radiation-induced edge effects in deep submicron cmos transistors," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.52, no.6, pp.2413–2420, Dec. 2005.
- [9] P. Roche, J. Autran, G. Gasiot, and D. Munteanu, "Technology downscaling worsening radiation effects in bulk: Soi to the rescue," 2013 IEEE International Electron Devices Meeting, pp.31.1.1–31.1.4, 2013.
- [10] L. Ding, S. Gerardin, M. Bagatin, S. Mattiazzo, D. Bisello, and A. Paccagnella, "Drain current collapse in 65 nm pmos transistors after exposure to grad dose," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.62, no.6, pp.2899–2905, Dec. 2015.
- [11] J. Prinzie, J. Christiansen, P. Moreira, M. Steyaert, and P. Leroux, "Comparison of a 65 nm cmos ring- and lc-oscillator based pll in terms of tid and seu sensitivity," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.64, no.1, pp.245–252, Jan. 2017.
- [12] T. Yoshida, J. Furuta, and K. Kobayashi, "Total ionizing dose effects by alpha irradiation on circuit performance and seu tolerance in thin box fdsoi process," IEEE International Symposium on On-Line Testing and Robust System Design), pp.236–238, June. 2019.
- [13] D. Yun, M. Park, C. Lim, and S. Baeg, "Study of tid effects on one row hammering using gamma in ddr4 sdrams," 2018 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), pp.P–SE.2–1–P–SE.2– 5, March 2018.
- [14] L.N. Kessarinskiy, D.V. Boychenko, A.G. Petrov, P.V. Nekrasov, A.V. Sogoyan, V.S. Anashin, and P.A. Chubunov, "Compendium of tid comparative results under x-ray, gamma and linac irradiation," 2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), pp.1–3, July 2014.