

重イオン照射による CMOS インバータの過渡現象

Transient effects on CMOS inverter caused by heavy-ion irradiation

○彦田将明¹, 高橋芳浩²

Nobuaki Hikota¹, Yoshihiro Takahashi²

Abstract: We investigated the transient response in CMOS inverters caused by heavy-ion irradiation. The dependences of Linear Energy Transfers of irradiated ion and load capacitance on response are evaluated. Based on these results, we explore the possibility of reproducing heavy-ion irradiation effects using a current source.

1. 序論

宇宙空間や原子炉周辺のような放射線環境下において半導体デバイスを使用すると、電離作用により発生した電荷によりかど電流が発生し、一時的に回路出力が変化する (SET: Single Event Transient). Fig.1に基本的な CMOS 回路である CMOS インバータを示す. また Fig.2には、Low 入力 (High 出力) において、OFF 状態の nMOS に重イオンが照射された際の出電圧、nMOS ドレイン電流の時間変化 (概念 Fig.2) を示す. 照射により発生した電荷により nMOS に過渡電流が発生し、出力電圧が低下する. その後、pMOS の ON 電流により負荷容量が充電され出力電圧は回復するものの、高い LET (Linear Energy Transfer) を有する重イオンが照射された場合には、電圧低下幅が大きくなり、メモリ状態の反転などの誤動作が発生する.

放射線照射時の過渡電流はデバイスシミュレーション使用し、ポアソンの方程式、電流連続の式を連立することにより、発生した電荷によるデバイス内の電位分布、電流分布解析から解析できる. ただし、CMOS 回路では被照射デバイスに他のデバイスが接続されており、発生電流によるノード電位変化も考慮して計算する必要があり、回路が複雑になればなるほど莫大な時間が必要となってしまう.

本研究では計算時間短縮のため、デバイスシミュレーションを用いずに、過渡電流を電流源と置き換え、回路シミュレータのみを用いて出力変化を予測する方法の確立を目的としている. これまでも同様な手法は提案されている [1] もの、電流源の波形決定には事前に多くのシミュレーション実行が必要となる. 今回は、最適な電流源の波形について検討するため、CMOS インバータの負荷容量および照射イオンの LET が出力電圧、過渡電流に及ぼす影響について評価した.

2. デバイスシミュレーション

電源電圧 $V_{DD}=3V$ の CMOS インバータを構成した. nMOS には、チャンネル長 $L=0.25\mu m$, チャンネル幅 $W=1\mu m$, 酸化膜厚 $d_{ox}=10nm$, 基板不純物濃度 $1 \times 10^{17} cm^{-3}$ のデバイスを使用した. また、ゲート電極の仕事関数により、しきい値電圧を $V_T=0.75V$ とした. なお相補対称特性とするため pMOS の $W=1.7\mu m$ と設定した.

2次元デバイスシミュレーション (Synopsys 製 Sentaurus TCAD) を用いて、入力電圧 $0V$ の状態において、OFF 状態である nMOS のゲート中心部に重イオンが垂直入射した際の CMOS インバータの出電圧 V_{OUT} , 被照射 FET の過渡電流 I_{Dn} の変化を評価した. なお、重イオンの飛程は基板の厚さと同じと設定した. また、ファンアウト数の変化による影響を評価するため、nMOS の 2 倍の容量を C とし、負荷容量を $1C \sim 10C$ まで変化させて影響を評価した. また入射重イオンの LET を $10, 20, 40 MeVcm^2/mg$ と変化させて影響を評価した.

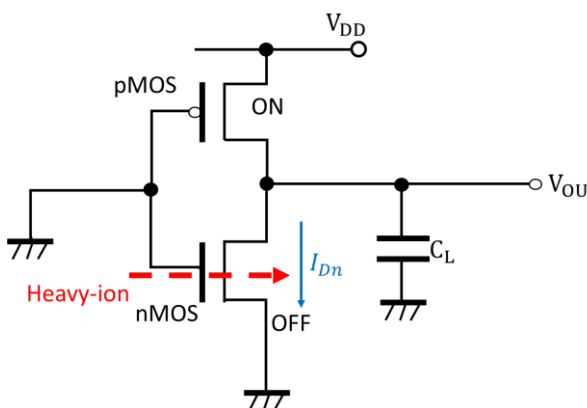


Figure 1. CMOS-inverter circuit.

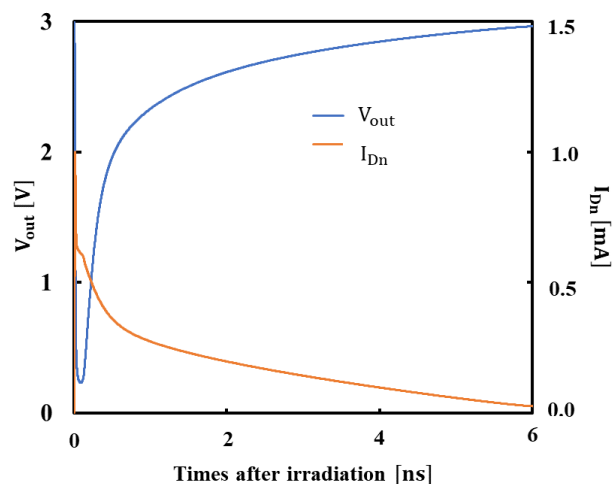


Figure 2. Response of CMOS Inv. caused by heavy-ion irradiation.

3. 結果及び考察

Fig. 3, 4 に、LET=10 の重イオンが照射された場合の CMOS インバータ出力 V_{out} , nMOS 過渡電流 I_{Dn} の負荷容量依存性を各々示す. 負荷容量 C_L の減少に伴い, 出力電圧の変動が大きくなること, またその際, 大きな過渡電流が発生し, このピーク電流値は C_L と共に大きくなることがわかった. C_L が小さい (1C) ときには照射誘起過渡電流により C_L の蓄積電荷がほぼ完全に放電し V_{out} はほぼ 0V になる. ただし, 10C のときには蓄積電荷量は 10 倍になるものの, 電流ピーク値は 1.8 倍程度しか増大していないために出力電圧変化は小さくなったことが理由と考えられる. なお, pMOS の ON 電流により C_L は再充電され V_{out} は回復するが, 電圧回復時のレスポンスに対する C_L 依存性は小さいことがわかった. 以上の結果, 上記のピーク電流値の決定メカニズムの解析が, 電流源の波形検討のためには必要であることがわかった.

Fig. 5, 6 には $C_L = 1C$ のインバータにおける照射イオンの LET 依存性を示す. 結果より, LET の増大に伴い出力電圧低下時間が増大すること, また, V_{out} が 0V 程度である時間において, 過渡電流はほぼ一定 (0.6mA 程度) となっていることがわかった. これは, MOSFET 内で照射により発生する電荷量が LET に比例するため, 発生した電荷が再結合により消滅するための時間が増大することが理由であると定性的に説明できる. ただし, 電流源の波形を検討する際には, 一定となる電流値の決定されるメカニズム, LET が電流が低下するまでの時間に及ぼす影響を定量的に評価する必要がある. なお, 照射後 0.1ns 以内において電流が瞬間的に 1mA 程度となるものの, このピーク値は LET にはほぼ依存しないことを確認した.

4. まとめ

CMOS 回路の重イオン照射誘起レスポンス評価に電流源を適用することを目的に, 負荷容量, 重イオンの LET が出力電圧, 過渡電流に及ぼす影響を評価した. その結果, 負荷容量に比べて LET の影響が大きいことを確認した. 今後, 過渡電流が決定されるメカニズムについて解析を進め, 電流源を用いた評価に適用する予定である.

参考文献

[1] D. Kobayashi, K. Hirose, T. Makino, H. Ikeda, H. Saito, "Feasibility Study of a Table-Based SET-Pulse Estimation in Logic Cells From Heavy-Ion-Induced Transient Currents Measured in a Single MOSFET", IEEE Trans. Nucl. Sci. vol.54, No.6, pp.2347-2354, Dec. 2007.

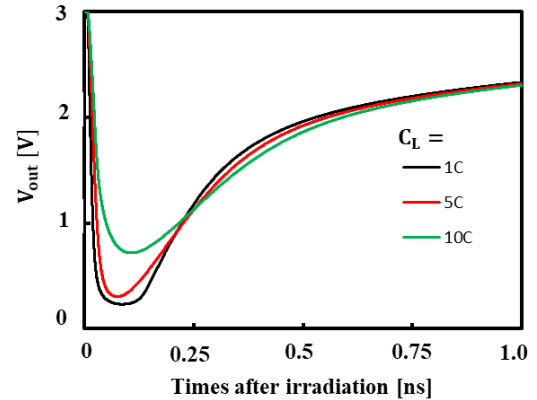


Figure 3. C_L dependence of on V_{out} (LET=10)

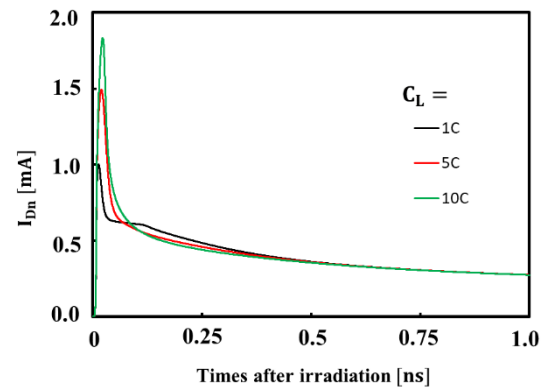


Figure 4. C_L dependence of on I_{Dn} (LET=10).

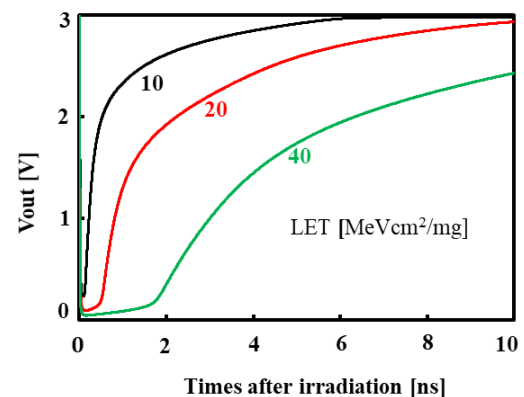


Figure 5. LET dependence of on V_{out} ($C_L = 1C$).

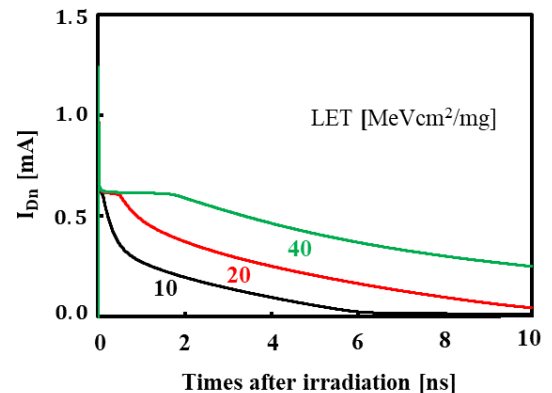


Figure 6. LET dependence of on I_{Dn} ($C_L = 1C$).