

微細 SOI-CMOS 構造の重イオン照射効果

The effect of heavy-ion irradiation for short channel SOI-CMOS structure

○山本航汰¹, 和田雄友¹, 高橋芳浩², 呉研²*Kohta Yamamoto¹, Yusuke Wada¹, Yoshihiro Takahashi², Yan Wu²

Abstract: In this study, we investigated the transient response in SOI-CMOS inverter induced by heavy-ion irradiation. The output voltage changes immediately after irradiation and then the voltage recovers gradually. The recovery time was independent of the load capacitance and the time was much greater than the time for step response. From these result, it was found that the recovery time is dominated by parasitic bipolar effect in irradiated MOSFET.

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ける半導体デバイスでは、重イオンのような高エネルギー荷電粒子照射により過渡電流が生じ、シングルイベント効果(SEE: Single Event Effect)と呼ばれる一時的な誤動作(ソフトウェア)が発生する。SEE は基板内部に埋め込み酸化膜 (BOX: Buried Oxide)を有し、活性層(SOI 層), BOX 層, 支持基板の 3 層構造からなる SOI (Silicon on Insulator)基板上にデバイスを作製することで、抑制可能であることが知られているが、微細化に伴って寄生バイポーラ効果(PBE: Parasitic Bipolar Effect)が問題となる[1].PBEは微細 SOI-nMOSFET において照射により発生した電荷のうち、電子はドレインに収集されるものの、正孔は Body 領域に蓄積されるため Body の電位が上昇し、Source/Body/Drain で構成される寄生バイポーラが動作することで、発生電荷量以上の電荷が収集される現象である。これまで我々は、PBE の影響が SOI-nMOSFET モデルの実効チャネル長(L_G)の微細化に伴って増大することを確認した[2]。また、PBE は CMOS インバータ回路におけるソフトウェアの 1 つであるノイズ伝播(SET: Single Event Transient)へ影響を及ぼすことを報告した[3]。SET は SOI-CMOS 回路におけるオフ状態の nMOS に対する荷電粒子照射により、nMOS に大きな過渡電流が流れるために、出力電圧が反転する現象である。ここに PBE が加わると、蓄積された正孔により nMOS のオン状態が維持され、出力反転状態がほぼ不変となる時間(図 1 中①)が存在するため、SET が長期化することが確認されている[3][4]。その後、nMOS がオフ状態となり、pMOS を介して出力容量へ電荷が充電され、出力反転状態から回復するが、この回復時間(図 1 中②)と PBE の関係についての詳細は不明である。本研究では、CMOS 回路におけるソフトウェアの 1 つである SET の出力反転状態からの回復

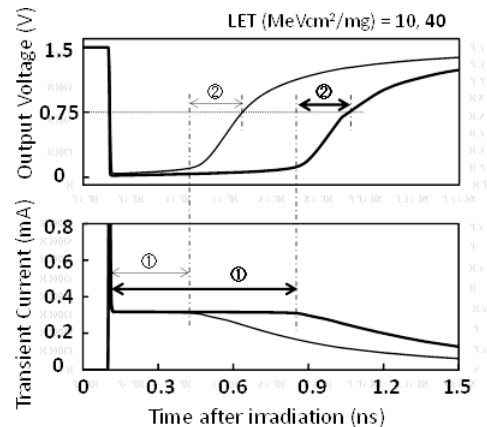


Figure.1. Radiation induced transient current and output voltage in CMOS inverter circuit.[3]

と PBE の関係を明らかにすることを目的として、デバイスシミュレーションを用いて SOI-CMOS インバータ回路のオフ状態の nMOS に重イオンを照射した際の負荷における出力電圧 V_{OUT} と nMOS ドレイン電流 $I_{D(n)}$ について検討した。

2. シミュレーション条件

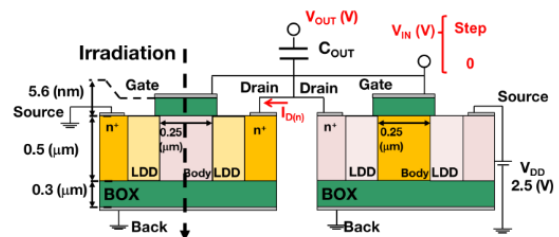


Figure.2. CMOS inverter model for device simulator

図 2 に CMOS インバータ回路のシミュレーションモデルを示す。このモデルに対して V_{IN} に初期条件 2.5V, $t=0s$ で $V_{IN}=0V$ となるようなパルス電圧を印加した際の

負荷(C_{OUT})におけるステップ応答を観察した。続いて、 $V_{IN}=0V$ でゲート電位を一定とした場合の同モデルにおいて $LET=10MeV\cdot cm^2/mg$ の重イオン(発生電荷量 $52fC$)が nMOS チャネル中心に垂直入射した際の C_{OUT} における出力電圧 V_{OUT} と nMOS ドレイン電流 $I_{D(n)}$ を観察し、ステップ応答との比較を行った。

3. CMOS インバータのステップ応答

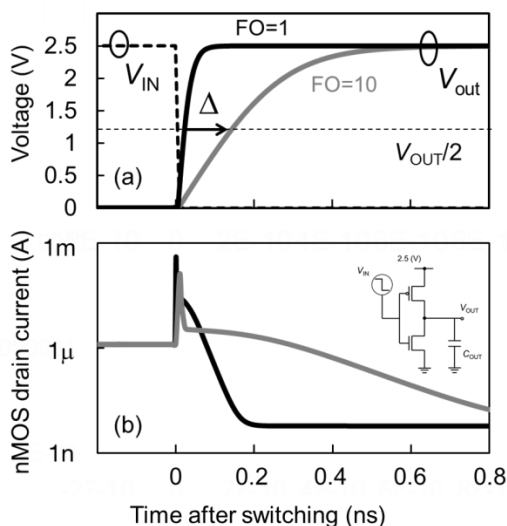


Figure.3. Step response of CMOS inverter, (a) Voltage V_{IN} and V_{OUT} (b) nMOS Drain current $I_{D(n)}$. Fan-out (FO) is defined a number of parallel C_{OUT} assumed next logic gates.

図 3 に CMOS インバータのステップ応答を示す。図 3(a)より $t=0s$ において V_{IN} は瞬間的に $2.5V$ から $0V$ へ変化する。それに対応して V_{OUT} が応答するが、負荷の増大(すなわち、FO の増大)に伴った遅延の増大が確認できた。また、(b)において $FO=1$ では $t=0.2ns$ で $I_{D(n)}$ がオフ電流と同等となっていることが分かる、以上から $FO=1$ のステップ応答では $0.2ns$ 程度で nMOS がオフ状態となることが分かった

4. CMOS インバータの重イオン照射効果とステップ応答の比較

図 4 に CMOS インバータに対する重イオン照射時の V_{OUT} と $I_{D(n)}$ の時間変化(上横軸)を示す。図 1 と同様に、照射後出力反転状態がほぼ不変である領域(Plateau region)と出力反転状態が回復する領域(Recovery region)に分けられる。本研究では Recovery region に着目するため、 $0.8ns$ を両領域の境界と定義し、Recovery region における時間を回復時間(t_R)とした(下横軸)。図 5(a)では FO に関係なく反転状態の回復に時間を要していることが分かる。その時間は図 3(a)と比較すると、 $FO=1$

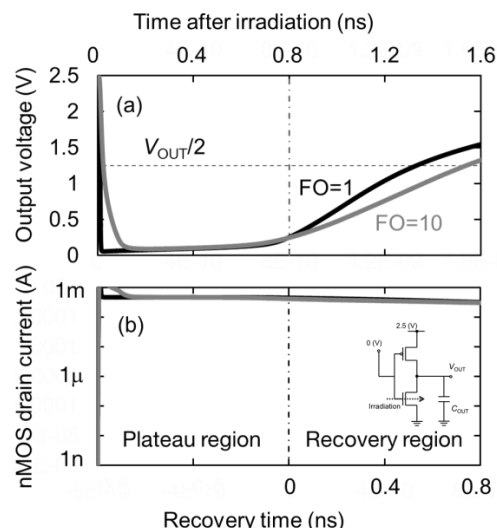


Figure.4 Radiation induced transient current and output voltage in CMOS inverter circuit. We defined that recovery time starts at $t=0.8ns$.

で約 25 倍であった。また図.3 において、 $t=0.2ns$ では nMOS がオフ状態であったにも関わらず、照射時は $t_R=0.2ns$ において大きな電流が流れていることから、PBE により nMOS がオン状態であることが分かる(図 5(b)).

以上から、PBE は nMOS をオン状態で維持し続けることで、負荷への電荷充電が妨げ、出力反転パルス幅を増大させることが明らかとなった。

5. 結論および謝辞

CMOS インバータのステップ応答と SET による出力反転状態の回復時間を比較し、SET の回復と寄生バイポーラ効果の関係について検討を行った。重イオン照射による PBE により nMOS のオン状態が維持されるために、負荷への充電が妨げられるため、回復に時間を要することが分かった。以上から PBE は出力反転状態を維持するだけでなく、その回復も妨げる効果であることが分かった。今後はこの現象の支配的要因を調査し、PBE 抑制に向けた指標を提示したい。

本研究の一部は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、シノプシス株式会社の協力で行われたものである。

[1] 高橋芳浩, REAJ 「信頼性」 Vol.36, No8, 2014/11
 [2] 山本航汰, 第 62 回 JSAP 春季学術講演会, 2015/02
 [3] 呉研, REAJ 第 23 回春季信頼性シンポ, 2015/06
 [4] D.Kobayashi et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. vol.56, no.6, p3043-3049, Dec. 2009.