

## CMOS 回路の重イオン照射誘起出力変化に対する計算時間短縮化に関する検討

A Study on Reduction of Simulation Time for Heavy-Ion induced Transient Output Voltage of CMOS circuits

○彦田将明<sup>1</sup>, 高橋芳浩<sup>2</sup>Nobuaki Hikota<sup>1</sup>, Yoshihiro Takahashi<sup>2</sup>

Abstract: We investigated the application of circuit simulation in calculating heavy-ion irradiation-induced output voltage changes in CMOS inverters to reduce computation time. We verify the feasibility of this approach by using the transient current characteristic, obtained from device simulation, as a current waveform for the circuit-level simulation.

## 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過渡電流が発生し、一時的に出力電圧が変化する (SET: Single Event Transient)。CMOS 組合せ回路において、OFF 状態の MOSFET に重イオンなどの電離放射線が照射されると、一時的に回路出力電圧が変動し、一定時間後に回復する。また、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変化時間が長くなり、誤情報の記憶などの回路誤動作が発生する。この出力電圧変動は、ポアソンの方程式、電流連続の式を連立したデバイスシミュレーションにより解析が可能である。ただし、最も簡単な CMOS インバータにおいても、照射による出力変動を計算するためには莫大な時間が必要となる。

そこで本研究では計算時間短縮のため、数少ないデバイスシミュレーションにより得られた過渡電流波形を、回路シミュレータの電流源として取り込むことにより、各種条件における出力変動を予測する方法について検討を行っている。これまでも同様な手法は提案されている[1]ものの、多くの条件におけるデバイスシミュレーションの実行が必要である。これまでにデバイスシミュレーションを用いて、重イオンの LET、負荷容量が CMOS インバータにおける過渡電流に及ぼす影響について検討してきた。今回は、デバイスシミュレーションにより得られた過渡電流波形を、回路シミュレーションに取り入れて出力電圧変動を計算し、比較により本方法の有効性について検討した。

## 2. シミュレーション方法

Fig. 1 に本研究で検討対象とした CMOS インバータ回路を示す。nMOSFET には、チャネル長  $0.25\mu\text{m}$ 、チャネル幅  $1\mu\text{m}$ 、酸化膜厚  $10\text{nm}$ 、基板不純物濃度  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  のデバイスを使用した。なお、相補対称特性とするため pMOSFET のチャネル幅は  $1.7\mu\text{m}$  とし、ゲート電極の仕事関数の調整により各 MOSFET のしきい値電圧 (絶対値) は  $0.75\text{V}$  と設定した。電源電圧  $3\text{V}$ 、入力電圧  $0\text{V}$  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出力電圧変動について評価した。Fig. 2 に、2次元デバイスシミュレーション (Synopsys 製 Sentaurus TCAD) を用いた計算結果 (出力電圧  $V_{\text{OUT}}$ 、および被照射 nMOS の過渡電流  $I_{\text{Dn}}$ ) を示す。本計算において  $\text{LET}=10\text{MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$  とし、重イオンの飛程は基板の厚さと設定した。また、負荷には同インバータが接続されていると仮定し、負荷容量として nMOS の 2 倍の容量を設定している。

Fig. 3 に本研究で検討した回路シミュレータ用の回路図を示す。各 MOSFET の特性は Spice パラメータとして記述し、被照射 nMOS と並列に接続した電流源に重イオン照射時のドレイン電流を適用し、重イオン照射による出力電圧変動を計算するものである。なお、シミュレータには LTSpice を使用した。

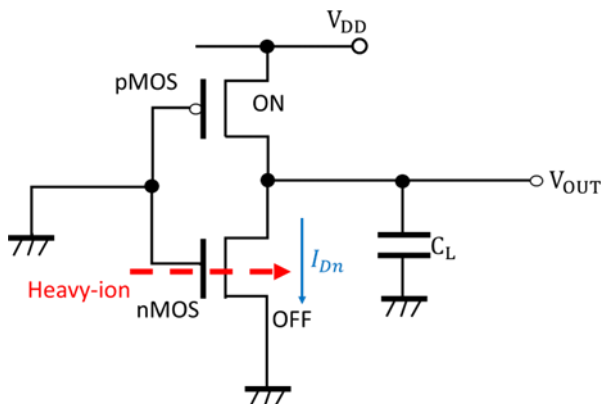


Figure 1. CMOS-inverter circuit.

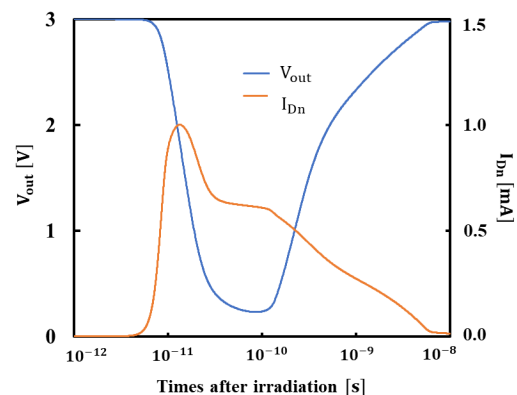


Figure 2. TCAD Simulation Results of Heavy-Ion Irradiation on a CMOS Inverter Circuit.

### 3. 結果及び考察

Fig. 4 にデバイスシミュレーション (TCAD) を用いて解かれた電流波形 (Fig. 2) を, そのまま電流源の波形として適用した結果を示す. TCAD による計算結果と比較すると, 約 0.1ns までの急峻な電圧変動は再現できなかったものの, 回路動作として重要な電圧反転持続時間 (電源電圧の 1/2 に戻るための時間) はほぼ再現可能であることがわかった. 急峻な電圧変動が再現できなかった理由は, Spice パラメータの抽出不足が原因だと考えている.

一方, 過渡電流波形を時間分割し, 各領域で数式モデル化する方法が提案されている[2]. この方法は, 電流が最大となる時間, 一定になり始める時間, 一定値から減衰し始める時間, および各電流値 (特徴点) から電流波形を数式で近似予測するものである. Fig. 4 に TCAD で得られた電流に適用した結果を示す. 細部に差異はみられるものの, ほぼ近似可能であることがわかる. Fig. 5 には, この波形近似予測モデルを用いて出力電圧変動を計算した結果を併せて示す. 結果より, 本近似法を用いても, ほぼ同等な電圧変動が得られることがわかった. これは, 過渡電流の特徴点が抽出できれば, 電圧変動時間が予測可能であることを示す.

これまでに, 一定となる電流値は pMOSFET の ON 電流と同等であること. 照射重イオンの LET を変化させると, ピーク電流はほぼ変化しないものの, 一定電流値から減衰し始めるまでの時間が大きく変化すること. 負荷容量の変化は, ピーク電流値が変化するという影響を与えることを明らかにしてきた. 以上より, デバイスシミュレーションによりある LET, 負荷容量における過渡電流を計算し, その特徴点を抽出すれば, LET や負荷容量が変化した場合の出力電圧変動が予測可能であると考えられる.

### 4. まとめ

CMOS 回路の重イオン照射誘起出力電圧変動に対する計算時間短縮を目的に, デバイスシミュレーションにより得られた過渡電流波形を, 回路シミュレーションの電流源として取り入れる手法について検討した. その結果, 電流波形の特徴点を抽出できれば, 回路シミュレーションにより電圧変動時間が予測可能であることを明らかにした. 今後, 本手法を拡張し, 重イオンの LET や負荷容量を変化させた際の適用可能性について検討を進める予定である.

### 参考文献

- [1] D. Kobayashi, et. al., "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, 2007.
- [2] Yujian Wang, et. al., "Efficient Modeling of Single Event Transient Effect with Limited Peak Current: Implications for Logic Circuits", MDPI, Journals, Micromachines, Vol.15, issue 7, 2024.

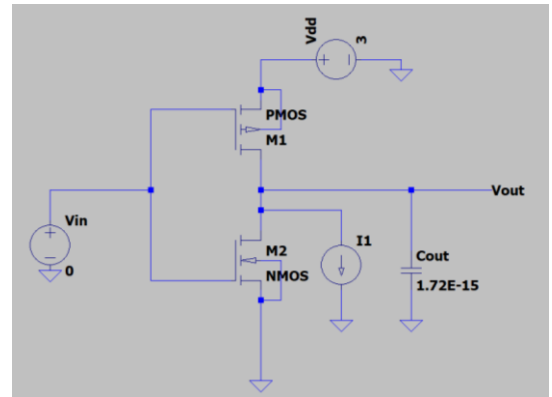


Figure 3. CMOS-inverter circuit in LTSpice.

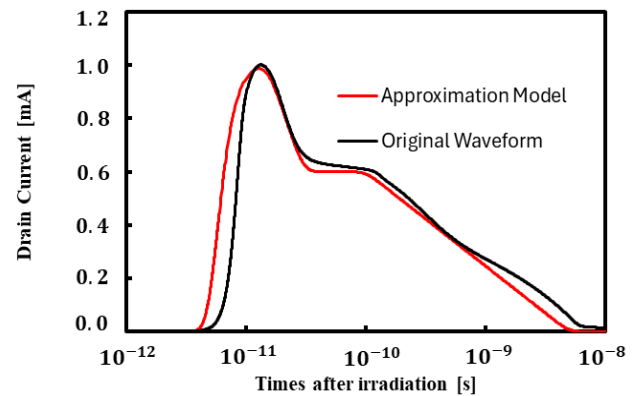


Figure 4. Waveform Comparison with the Approximated Prediction Model.

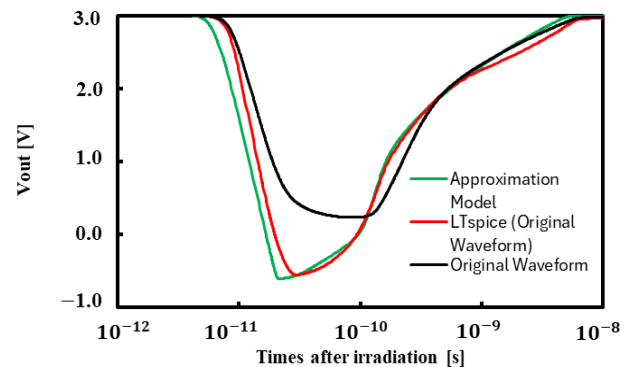


Figure 5. Comparison of Voltage Waveforms for Different Applied Currents.