

M-2

PN-Body Tied SOI MOSFET の CMOS インバータの検討

PN-Body Tied SOI-MOSFET CMOS inverter study

○古川遼太¹, 安田光保¹, 中野敬介¹, 呉研², 高橋芳浩²* Ryota Furukawa¹, Kosuke Yasuda¹, Keisuke Nakano¹, Yan Wu², Yoshihiro Takahashi²

Abstract: We studied the design of a CMOS inverter for PNBT devices. The results confirmed that the PNBT device can operate as a CMOS inverter. It was also confirmed that voltage fluctuations caused by heavy ion irradiation in a CMOS inverter can be recovered in a short time by having a body tie compared to a normal MOSFET.

1. 序論

MOSFET により構成される半導体集積回路を、宇宙空間や原子炉周辺などの強い放射線環境下で使用した場合、重イオンなどの電離放射線照射により発生した電荷に起因して一時的な誤動作（ソフトエラー）が生じる。SOI(Silicon on Insulator)デバイスは、薄い活性層が埋め込み酸化膜で電気的に分離されていることから、高いソフトエラー耐性を有する構造として注目されている。更に Body Tie を付加することにより、SOI デバイスで問題となる寄生バイポーラ効果の抑制も可能となり、優れたソフトエラー耐性が得られる。一方近年、Body Tie 構造に pn 接合を導入した PN-Body Tied SOI-MOSFET (PNBT デバイス) を用いる事により、非常に急峻なサブスレッショルド特性が得られることが報告されている[1]。Fig1 にデバイス構造を、Fig.2 に Id-Vg 特性を示す。結果より、Body Tie 端子電圧 (V_B) に正電圧を印加することにより Id の立ち上がり非常に急峻になることがわかる。これは、Body で発生した電子が Body Tie に収集される際、 n^+ 領域の電位が下がることにより、 p^+ 領域から Body に正孔が供給され、Body 電位が上昇するというフィードバックが働くことが原因である。しかし、OFF 状態の PNBT デバイスに重イオンが照射された場合、照射により発生した電荷が原因となり、上記と同様なフィードバックが機能し、大きな過渡電流が発生する可能性が考えられる。そこで PNBT デバイスの入出力特性、放射線照射効果について 3 次元デバイスシミュレーションを用いて検討を行った。

2. 計算モデル及びシミュレーション条件

チャネル長 $1\ \mu\text{m}$ 、チャネル幅 $2.4\ \mu\text{m}$ 、ゲート酸化膜厚 $10\ \text{nm}$ 、SOI 膜厚 $50\ \text{nm}$ 、BOX 膜厚 $200\ \text{nm}$ として n チャネル MOSFET の 3 次元モデルを作成した。なお各領域の不純物濃度は p-Body: $1 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ 、Source/Drain: $1 \times 10^{20}\ \text{cm}^{-3}$ 、Body Tie: n^+, p^+ 共に $1 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ とした。 $V_G = V_S = 0\ \text{V}$ のオフ状態のデバイスにおいて、ゲート電極中央に線エネルギー付与 (LET: Linear Energy Transfer) $10.0\ \text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 、飛程 $10\ \mu\text{m}$ の重イオンが垂直入射した際の照射誘起電流の計算を行い、ドレイン電極における照射誘起電流及び収集電荷量について検討を行った。なお、重イオンは計算開始後 $10^{-11}\ \text{s}$ で照射されるように設定を行った。また比較対象として、Body Tie なしのデバイス、 n^+ 領域なしの通常の Body Tie を有するデバイスについても計算を行った。また、PNBT CMOS インバータ(Fig.3)について設計を行い、入出力特性の検討を行った。

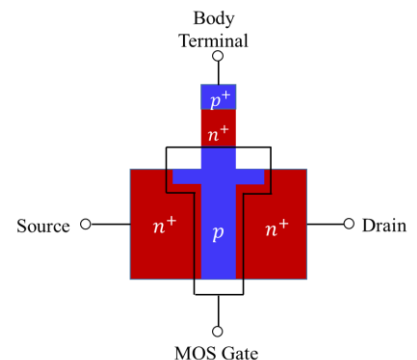


Fig. 1 PNBT SOI MOSFET

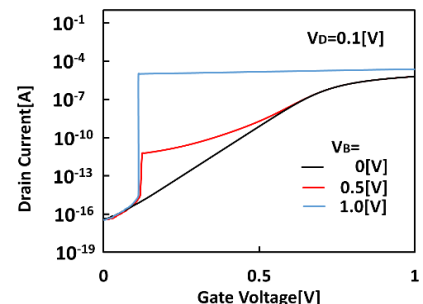


Fig. 2 Id-Vg Characteristic simulation

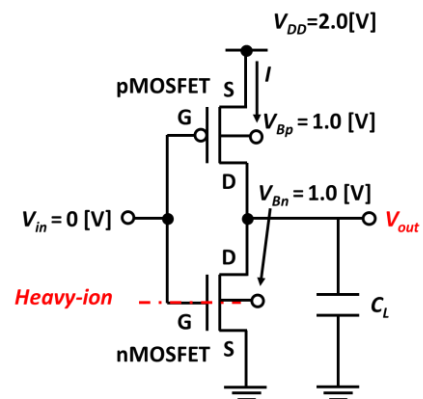


Fig.3 CMOS inverter circuit with PNBT device

3. 結果・考察

Fig5 に、 V_B を 0, 0.4, 1.0 V と変化させた場合の照射誘起電流を示す。なお、本計算では $V_D=2.5$ V とした。結果より $V_B=1.0$ V の場合、誘起電流は照射後 1 μ s 以上の長時間に至るまで流れ続けることがわかった。Body に蓄積した正孔により Body 電位が上昇すると同時に、 V_B により電子が Body Tie の n^+ 領域に収集されることにより n^+ 層の電位が下がる。これにより Body Tie の p^+ 領域より正孔が Body に注入されることにより Body 電位の回復が阻止され、長時間ドレイン電流が流れ続けることがわかった。これは、PNBT デバイスのフィードバック機能と同じ原理であり、 V_B を印加した PNBT 構造では Body Tie なしの従来の MOSFET よりも、重イオン照射による収集電荷量が大きくなってしまふことを明らかにした。Fig.6 に通常の CMOS インバータと Body Tie を挿入した Body Tie CMOS インバータへの重イオン照射効果を示す。Fig.6 より MOSFET より、Body Tie MOSFET の方が重イオン照射後の電圧変動回復時間が短くなっていることが分かる。これは Body Tie を有することで重イオンによって発生した電荷を素早く Body Tie 側に抜ける為、電圧変動時間も短縮できたと考えられる。この事から、Body tie を有する PNBT デバイスを CMOS 回路として動作した場合でも照射誘起電流を低減できるのではないかと考えられる。

そこで、PNBT CMOS インバータの設計を行った。電源電圧($V_{DD} = 2.0$ V)とし、 n , p 共にしきい値電圧を $|0.4$ V| とするためにゲート電極の仕事関数差を調整した。また、 $V_{DS} = 1.0$ V で ON 電流を一致させるために p 型 PNBT デバイスのチャネル幅を調整した。PNBT CMOS インバータの入出力特性の計算結果を Fig.7 に示す。Fig.7 よりほぼ対称的な CMOS インバータの入出力特性を確認出来た。

4. まとめ

通常の MOSFET に比べ Body Tie を有する事で、CMOS インバータでも重イオン照射によって発生した電圧変動を短時間で回復できることを確認した。また、PNBT デバイスの CMOS インバータの設計について検討を行った。結果より仕事関数を代入し、しきい値電圧を合わせる事で PNBT CMOS インバータの動作を確認できた。今後は PNBT CMOS インバータにおいて重イオン照射効果の検討を行う予定である。

謝辞

本研究は、東京大学大規模集積システム設計教育研究センター(VDEC)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。

参考文献

[1] Jiro IDA et.al ; “Characterization of Hysteresis on SOI Based Super Steep Subthreshold Slope FET’s”, IEICE, Vol.E101-C, No.5, pp.334-337, 2018.

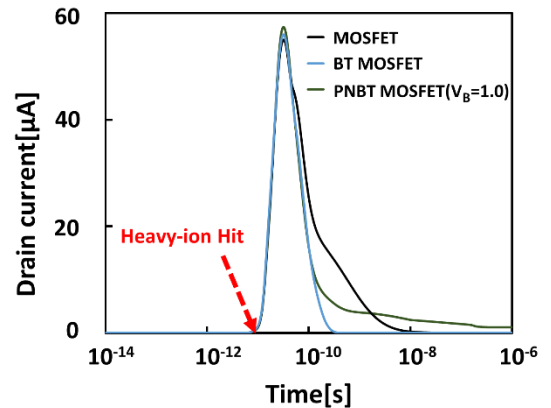


Fig. 5 Heavy ion induced transient current of PNBT device

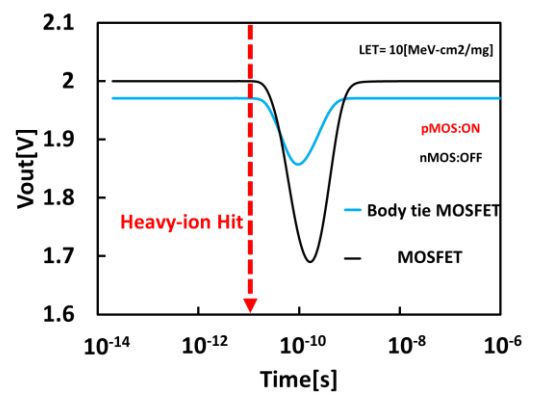


Fig. 6 Heavy ion induced Voltage

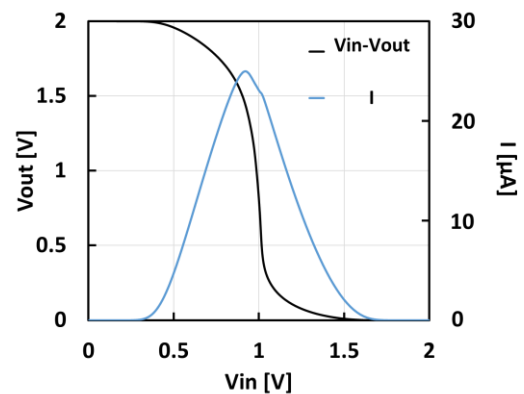


Fig. 7 Vin-Vout characteristic(PNBT device)