

微細 SOI-MOSFET における照射誘起寄生バイポーラ効果に関する研究 A study on irradiation induced parasitic bipolar effect in short channel SOI-MOSFET

○山本航汰¹, 家城大輔¹, 和田雄友², 呉研³, 高橋芳浩³*Kouta Yamamoto¹, Daisuke Ieki¹, Yusuke Wada², Yan Wu³, Yoshihiro Takahashi³

Abstract: In this study, we investigated channel length dependence of parasitic bipolar effect in SOI-MOSFET by heavy-ion irradiation using device simulation. The energy difference between source and channel body dropped abruptly because of storing charge generated by irradiation, and then the parasitic bipolar transistor that consisted of source / channel / drain was turned on. It was found that the bipolar gain increased with reducing channel length because the energy dropped more abruptly in shorter channel device.

1. はじめに

宇宙空間や原子炉周辺のような放射線環境下において、半導体デバイスに電離放射線が照射されると、電離作用によりその飛程に沿って電子正孔対が発生する。それらの電荷が電極に収集されることにより回路内に誘起電流が流れ、半導体デバイスの一時的な誤動作(ソフトエラー)が起こる。この現象をシングルイベント効果 (SEE: Single Event Effect) という。

半導体デバイスは高集積化、高性能化を目的とした微細化(スケールアップ)が進んでおり、高信頼性が求められている宇宙用半導体デバイスにおいても同様である。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) 基板上に作製された半導体デバイスは、BOX 層によって支持基板で発生した電荷の収集が抑制されることから、SEE に耐性があることが知られている。しかし、近年の宇宙飛行体搭載部品として主流のデバイスであるサブミクロンサイズの SOI-MOSFET において、SOI 層における発生電荷量以上の電荷収集が観測される現象[1]があり、問題となっている。その原因の一つとして、電離放射線により発生した正孔が SOI 層 Channel 下部の Body 領域に蓄積されることで、Channel ポテンシャルが変化し、発生電荷量以上の電荷収集が引き起こされる寄生バイポーラ効果の影響がある。サブミクロン SOI-MOSFET の寄生バイポーラ効果を抑制することは、ソフトエラーを低減させるための重要な課題の一つである。この効果によるデバイスへの影響はチャネル長が短くなるほど大きくなることが予想されるが、そのメカニズムについては詳細に知られていない。

そこで本研究では、チャネル長スケールアップと寄生バイポーラ効果の関係性を明らかにする目的で、サブミクロン NMOS モデルに対する照射後のチャネルエネルギーの時間的変化と、収集電荷量をデバイスシミュレータ上で観察し、結果に対する検討を行った。

2. 計算モデル

図 1 に計算モデルを示す。p 形 (濃度 $3 \times 10^{17} [\text{cm}^{-3}]$), SOI 層厚さ $0.5 [\mu\text{m}]$, ゲート酸化膜厚さ $18 [\text{nm}]$, チャネル長 $L_g [\mu\text{m}]$, Drain, Source 濃度 $1 \times 10^{19} [\text{cm}^{-3}]$ である NMOS モデルを作成し、線エネルギー付与(LET: Linear Energy Transfer): $10 [\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}]$, 飛程 $10 [\mu\text{m}]$, 重イオンがチャネル中心に垂直入射したと仮定し、誘起電流および収集電荷量のシミュレーションを行った。この重イオンにより SOI 層内で発生する電荷量は約 $52 [\text{fC}]$ である。なお、チャネル長 L_g は $1.0, 0.7, 0.4 [\mu\text{m}]$ と変化させ、BOX 層を介した変位電流の影響[2]を除外するために、支持基板を除いた構造となっている。

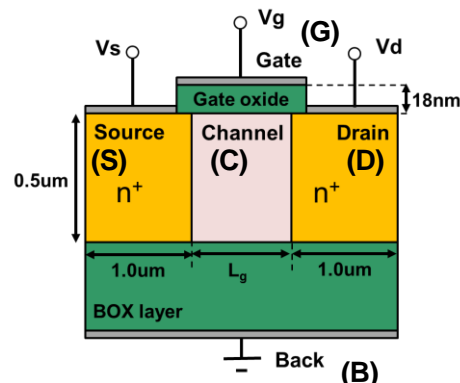


Figure 1 Simulation model

3. 計算結果・考察

図 2 に $V_g=0.0 [\text{V}]$, $V_d=1.0 [\text{V}]$, $V_s=0.0 [\text{V}]$ としたときのドレイン電流および収集電荷量(電流の時間積分値)の時間変化を示す。誘起電流のピーク値はチャネル長の逆数に対して直線的に増大することが分かった。また、発生電荷量(約 $52 [\text{fC}]$) 以上の電荷収集が観測され、短チャネル化に伴い収集電荷量が増大することを確認した。

結果として、寄生バイポーラ効果は短チャンネルになるほど強くなることが分かった。

図3にエネルギーバンドの時間変化を示す。照射後、0.1 [ns]でChannelの電子エネルギーは最も大きく下がり、その後時間経過に伴って、初期状態に戻る様子が確認できた。発生した電子正孔対のうち、電子はCDの電位差によって速やかに収集されるが、Channelの正孔はBody領域に蓄積されるため、Channelの電子エネルギーが急峻に下げられる。そのため、SourceからDrainに対して大きな電子注入が起る。その後、再結合により徐々に正孔が消失するため、エネルギーは時間変化に対し、緩やかに初期状態に戻る。以上がこの現象(寄生バイポーラ効果)のメカニズムであることが分かった。

図4にSource edge (Location=0.0 [μm], 図3)とChannelとのエネルギー差の時間変化を示す。本研究のデバイスモデルにおいて、SourceをEmitter, BodyをBase, DrainをCollectorとした寄生トランジスタはChannelのEcが約0.14 [eV] (V_{BE}=0.74 [V]に相当)となるとオン状態になる。結果より、照射後約0.01 [ns]経過でBody領域に蓄積された正孔により寄生トランジスタがオン状態となり、約10 [ns]で再びオフ状態に戻ることが分かった。ただし、短チャンネル化に伴ってより早い時間でオン状態となる。以上の結果から短チャンネル化に伴って、寄生トランジスタのオン時間は長期化することが分かった。

発生電荷量 Q_{Generation} に対する収集電荷量 Q_{Collected} の比を Bipolar gain と呼び、寄生バイポーラ効果の影響度を示す。本モデルでは、照射後 10 [ns]以降では寄生トランジスタがオフ状態となる。よって、実効的な Bipolar gain は 10 [ns]までの収集電荷量によって決まる。V_d=1.0 [V], V_s=0.0 [V]における、照射後 10 [ns]までの Bipolar gain を表1に示す。結果より Bipolar gain はチャンネル長の逆数に対して直線的に増大することが分かった。

Table 1 Bipolar gain (V_d=1.0 [V] V_s=0.0 [V] after irradiation 10[ns])

	Lg [μm]		
	1	0.7	0.4
Q _{collected} [fC]	292	351	483
Q _{generation} [fC]	52	52	52
Bipolar gain	5.7	6.8	9.4

4. まとめ

寄生バイポーラ効果のメカニズムの確認ため、MOSFETのChannel中心に重イオン照射を行った。Body領域に蓄積された高密度の正孔によりChannelの電子エネルギーが変化し、Source-Drain間で電荷収集を誘起した。また、短チャンネル化に伴いChannelの電子エネルギーの低下が長期化した。これにより誘起電流のピークおよびBipolar gainはチャンネル長の逆数に対して直線的に増大することが分かった。

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] 村瀬祐児：「MOS構造における重イオン照射誘起電流の計算シミュレーション」, 平成15年度 日本大学理工学部 学術講演会
- [2] 小宮山隆洋：「SOI基板上に作製したMOSFETにおける重イオン照射誘起電流」, 平成25年度 日本大学理工学部 学術講演会

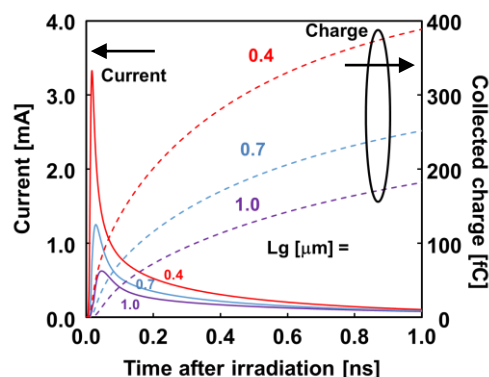


Figure 2 Transient current and collected charge at Drain electrode (V_g=0.0 [V] V_d=1.0 [V] V_s=0.0 [V])

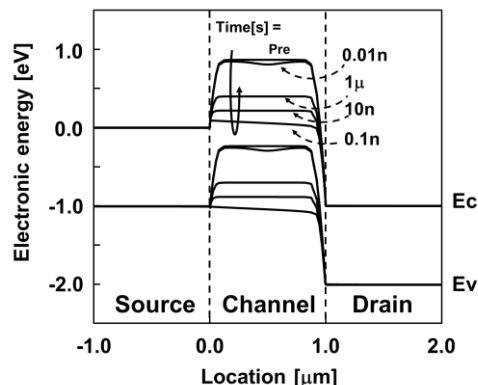


Figure 3 Band diagram (L_g=1.0 [μm] V_g=0.0 [V] V_d=1.0 [V] V_s=0.0 [V])

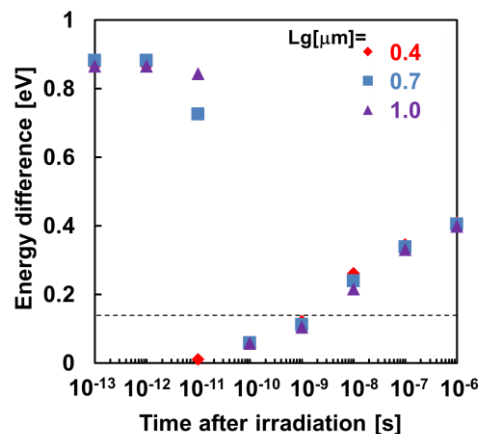


Figure 4 Energy difference between Source and Channel (V_d=1.0 [V] V_s=0.0 [V])