

SOI デバイスの重イオン照射誘起電流抑制に関する検討

A study on reduction of heavy-ion induced current in SOI device

○竹安秀徳¹, 岡崎勇志¹, 大谷拓海², 小倉俊太², 高橋芳浩³*Hidenori Takeyasu¹, Yuuzi Okazaki¹, Takumi Ohtani², Shunta Ogura², Yoshihiro Takahashi³

Abstract: We have investigated reduction of heavy-ion induced collected charge in SOI pn junction Diode. We show that the collected charge can be reduced by decreasing the width of depletion layer at the surface of handle substrate.

1. 序論

半導体デバイスは、強い放射線環境である宇宙空間においては放射線の影響による誤動作や特性劣化が問題となる。そのような背景から半導体デバイスの耐放射線性に関する研究が進められている。半導体素子の耐放射線効果のひとつに、一時的に誤動作や故障を引き起こされるシングルイベント効果がある。これは高エネルギー粒子（重イオンなど）の照射により半導体内部に電子正孔対が発生し電極に収集される事により回路内に過渡電流が流れ、誤動作や故障を引き起こす現象である。したがって半導体素子にはシングルイベント耐性が要求される。シングルイベント耐性が高いと注目されている構造の1つに SOI (Silicon on Insulator) 構造がある。SOI 基板上に作製した SOI デバイスは、基板中で発生した電荷の収集が BOX 層（埋め込み酸化膜）により抑制されると考えられる。しかし過去の実験で、活性層における発生電荷量以上の収集電荷が確認された。一方これまでの研究で、予想を上回る収集電荷の原因は BOX 層を介した変位電流であるとの結論を得た^[1]。変位電流は、半導体中で発生した電子正孔対の内、一部が空乏層電界により BOX 層下に蓄積し、これらの電荷と電荷中性条件を満たすように電源から電子が供給されることにより発生する。つまり支持基板表面の空乏層幅を減少することにより変位電流の抑制ができると予想される。そこで本研究では、SOI デバイスにおける支持基板の表面状態が誘起電流に及ぼす効果についてシミュレーションを用いて検討した。また、シミュレーション結果の検証のため照射実験を行った。

2. 計算モデル及びシミュレーション条件

図 1 に計算モデルの概略図を示す。モデルは軸対称円筒形とした活性層が n 形 ($N_D=10^{15}\text{cm}^{-3}$) の SOI pn-Diode である。印加電圧は Anode 電極に -10V, Cathode 電極および Back 電極は接地とした。このような構造に加速エネルギー 15MeV の O イオンが Anode 電極中心に垂直入射するものとし、計算開始後 10^{-11}s に照射されるものとした。深さ方向 LET 分布は同様であり、電子正孔対は飛程に沿って均一に発生するとして計算を行った。この場合、飛程は $10\mu\text{m}$ となり、LET は $6.53\text{MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$ である。LET よりイオン通過距離 $1\mu\text{m}$ あたりの発生電荷量は 67fC となり、活性層 ($1.5\mu\text{m}$) での発生電荷量は 100fC 程度となる。

以上のような条件で、支持基板のタイプや不純物密度が誘起電流に及ぼす効果について検討を行った。

3. 結果・検討

図 2 に、これまでの照射実験で使用したデバイスと同じ、n 形支持基板 ($N_D=10^{15}\text{cm}^{-3}$) の場合についての計算結果を示す。実線は誘起電流を示し、点線は収集電荷量（電流の時間積分値）を示す。また、電流の極性は電極から流れ出す方向を正とした。Anode 電極の最大収集電荷量が約 260fC であり、活性層での発生電荷量 100fC の約 2.6 倍であることがわかる。これは BOX 層を介した変位電流が原因である。Back 電極における収集電荷量（約 170fC ）は変位

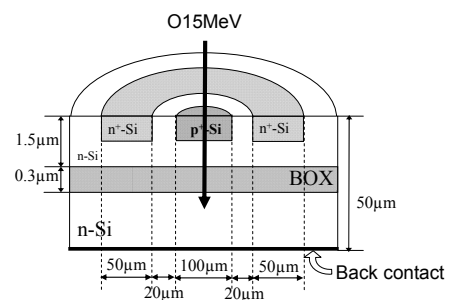
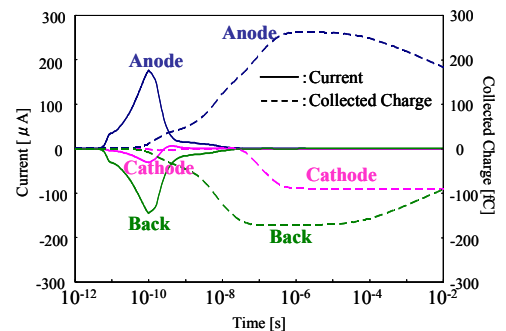


Figure 1. Simulation model

Figure 2. Simulated heavy-ion induced current and collected charge (n-type handle substrate: $N_D=10^{15}\text{cm}^{-3}$)

電流によるものであるため、収集電荷量を抑えるためには Back 電極における収集電荷量を抑える必要があることがわかった。

図 3 に支持基板タイプを p 形 ($N_A=10^{15}cm^{-3}$) にした場合の計算結果を示す。図 2 の結果と比較すると、変位電流に起因する Back における収集電荷量が抑えられ、その結果 Anode における収集電荷量が約 100fC に抑えられている。これは逆バイアス印加時の支持基板表面が蓄積状態となるため、発生した電子正孔対の多くが初期の再結合過程により消滅したため、変位電流が抑制されたためと考えられる。

図 4 に支持基板を高不純物濃度 n 形 ($N_D=10^{17}cm^{-3}$) とした場合の計算結果を示す。支持基板を p 形とした場合と同様 Anode における収集電荷量が約 100fC に抑えられていることがわかる。これは支持基板の不純物濃度を 2 桁上昇させたことにより、支持基板表面の空乏層幅が 1/10 になり、多くの発生電荷が初期の再結合により消滅し、変位電流が抑制されたためと考えられる。

以上の結果より空乏層幅の抑制により収集電荷が抑制可能であることがわかった。これを確認するために、支持基板印加電圧により支持基板表面の空乏層幅を変化させ、収集電荷量に及ぼす影響を実験により評価した。なお活性層及び支持基板が n 形 ($N_D=10^{15}cm^{-3}$) の試料を用いて実験を行った。

図 5 に支持基板印加電圧が 0,-10V における実験結果を示す。印加電圧を Anode 電極印加電圧 (-10V) と等しくすることにより収集電荷量が活性層発生電荷量である 100fC 程度に抑制されることがわかる。これは支持基板表面がほぼフラットバンド状態 (空乏層電界=0) となり、変位電流による電荷収集が減少したためである。この結果より、支持基板表面の空乏層電界により変位電流が制御できることを実験的に確認した。

4. まとめ

SOI デバイスの重イオン照射シミュレーションを行い、支持基板表面状態が誘起電流及び収集電荷に及ぼす影響を評価した。支持基板表面の空乏層幅の減少により BOX 層を介した収集電荷量が抑制可能であることを示した。そこで支持基板印加電圧により支持基板表面の空乏層幅を変化させた場合の重イオン照射実験を行い、空乏層幅の減少に伴い収集電荷量が抑制できることを実験的に確認した。

今後、集積回路に本検討方法を適用した場合の耐シングルイベント効果向上について確認する予定である。

5. 参考文献

[1] Y.Takahashi, et.al.; “Heavy-ion induced current through an oxide layer”, Nucl. Instr. and Meth. B 260 (2007) 309.

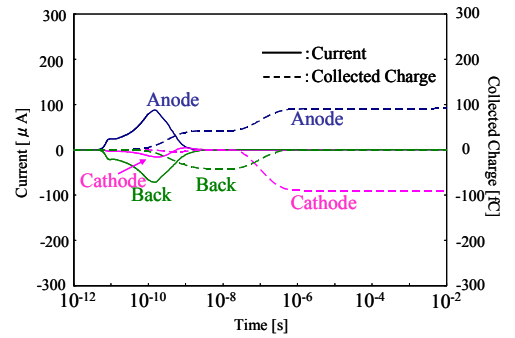


Figure 3. Simulated heavy-ion induced current and collected charge (p-type handle substrate: $N_A=10^{15}cm^{-3}$)

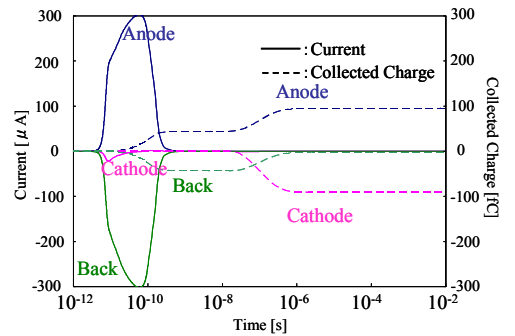


Figure 4. Simulated heavy-ion induced current and collected charge (n-type handle substrate: $N_D=10^{17}cm^{-3}$)

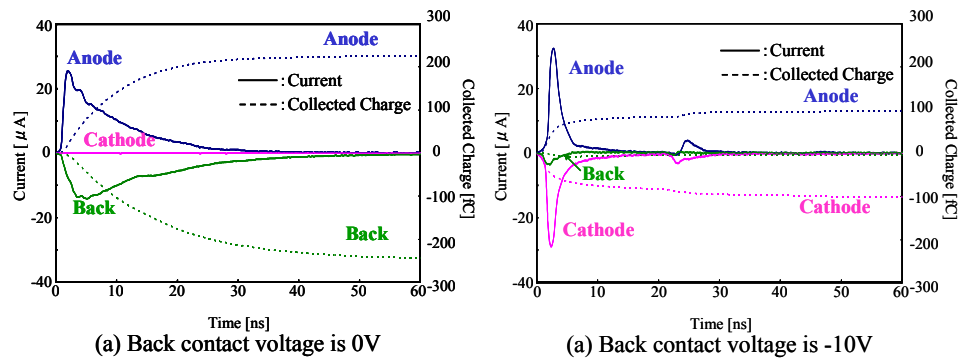


Figure 5. Heavy-ion induced current and collected charge (Back contact voltage is 0 or -10V)