

## SOI-トンネル FET の電気的特性 (デバイスパラメータ依存性)

The device parameter dependence on electrical properties of SOI-Tunnel FET

○唐鎌亮太<sup>1</sup>, 岩波悠太<sup>1</sup>, 三田梓郎<sup>2</sup>, 岸佳佑<sup>2</sup>, 山口直弥<sup>2</sup>, 呉研<sup>3</sup>, 高橋芳浩<sup>3</sup>\* Ryota Karakama<sup>1</sup>, Yuta Iwanami<sup>1</sup>, Shiro Mita<sup>2</sup>, Keisuke Kishi<sup>2</sup>, Naoya Yamaguchi<sup>2</sup>Yan Wu<sup>3</sup>, Yoshihiro Takahashi<sup>3</sup>

Abstract: The device parameter (oxide thickness and impurity concentrations of each region) dependence on the electrical properties of the Tunnel FET was studied by simulation. It was confirmed that the drive current could be improved by thinner gate oxide film, and lower OFF current could be obtained using body and drain with low impurity concentration.

## 1. 序論

現在、半導体デバイスは高い信頼性を有しているが、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、一時的な誤動作(ソフトウェア)や恒久的な故障(ハードエラー)などが問題となる。半導体デバイスに電離放射線が照射されると、その飛程に沿って高密度の電子正孔対が発生し、その一部が電極に収集されることにより回路に過渡電流が流れ、一時的な誤動作や故障が引き起こされる。この現象をシングルイベント効果(SEE: Single Event Effect)という。一方、基板内に埋め込み酸化膜(BOX: Buried Oxide)層を有するSOI(Silicon on Insulator)デバイスでは、BOX層により支持基板で発生した電荷の収集が抑制されることから、放射線耐性に効果があることが知られている。しかし、SOIデバイスの欠点の一つとして、寄生バイポーラ効果が挙げられる<sup>[2]</sup>。寄生バイポーラ効果とは、放射線照射により発生した正孔(電子)がBodyに蓄積することで、Bodyのポテンシャルが変化し、SourceからDrainへ放射線により発生した電荷量以上の電荷が注入される現象である。寄生バイポーラ効果を抑制することは、ソフトウェア低減のための重要な課題の一つとなっている。

寄生バイポーラ効果の抑制方法の一つとして、トンネルFETの利用が提案されている。トンネルFETはSourceからBodyへのキャリアのトンネル注入を駆動原理とするデバイスであり、Source, Drainにそれぞれ異なる不純物原子を導入することにより階段状のエネルギーバンドが形成される。これまでの研究で、放射線照射により発生した電荷はBodyに蓄積されることなくSource, Drainに収集されることにより寄生バイポーラ効果を抑制できることをシミュレーションにより確認している<sup>[2]</sup>。また従来のMOSFETに比べて急峻なサブスレッショルド特性を持っているので、低電圧駆動による集積回路の低消費電力化が期待されている。本研究では、実際のデバイス作製を目指し、不純物濃度や酸化膜厚などのデバイスパラメータがトンネルFETの電気的特性に及ぼす影響について検討した。

## 2. デバイスシミュレーション

Fig. 1に計算モデルを示す。使用したデバイス構造の各パラメータは、ゲート長 $L_G=0.25\mu\text{m}$ 、ゲート幅 $W=1\mu\text{m}$ 、SOI層 $T_{\text{SOI}}=0.1\mu\text{m}$ 、BOX層 $T_{\text{BOX}}=0.3\mu\text{m}$ である。本研究ではGate酸化膜厚 $T_{\text{OX}}$ 、Bodyの不純物濃度 $N_B$ 及びドレイン電圧 $V_D$ が $I_D$ - $V_G$ 特性に及ぼす影響について検討を行った。これらの条件をTable. 1に示す。

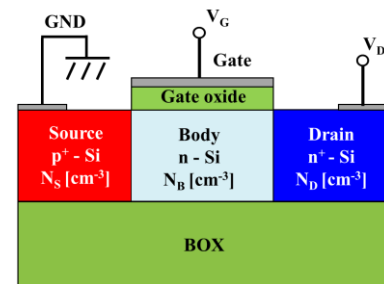


Fig. 1 Simulation model for Tunnel FET

Table. 1 Device parameters

Thickness of gate oxide ( $T_{\text{OX}}$ )	Impurity concentration of Body ( $N_B$ )	Drain voltage ( $V_D$ )
1~10 [nm]	$10^{16}\sim 10^{19}$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	1~5 [V]

1: 日大理工・院(前)・電子, 2: 日大理工・学部・電子, 3: 日大理工・教員・電子

### 3. 結果・考察

Fig. 2 に、 $N_B=10^{18}\text{cm}^{-3}$ 、 $V_D=1\text{V}$ の条件でゲート酸化膜厚  $T_{OX}$ を変化させた時の $I_D$ - $V_G$ 特性を示す。 $T_{OX}$ の薄膜化に伴い、電流の立ち上り電圧の低下、駆動電流の向上を確認した。 $T_{OX}=1\text{nm}$ におけるON電流は $10\text{nm}$ の結果に比べて3桁以上高くなり、駆動電流向上が可能となる。しかし、酸化膜のリーク電流、絶縁破壊を考慮すると、酸化膜電界は $7\text{MV/cm}$ 程度以下に設定する必要がある。 $T_{OX}=5\text{nm}$ における酸化膜電界は $6\text{MV/cm}$ 程度であることを確認しており、今後の検討では $T_{OX}=5\text{nm}$ を用いる事とした。

Fig. 3 にボディの不純物濃度  $N_B$ を変化させた時の $I_D$ - $V_G$ 特性を示す。 $N_B > 10^{18}\text{cm}^{-3}$ となるとOFF電流ゲート電圧が増加していることがわかる。これは、高不純物濃度化によりソース-ボディ間のトンネル長が減少したことによるバンド間トンネリング電流によるものである。一方、 $N_B < 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ではOFF電流はほぼ変化せず $10^{-16}\text{A}/\mu\text{m}$ 程度であった。このことから、 $N_B=10^{18}\text{cm}^{-3}$ として以下の検討を進める。

Fig. 4(a), (b)に、 $N_D=10^{20}$ ,  $10^{17}\text{cm}^{-3}$ における $I_D$ - $V_G$ 特性のドレイン電圧 $V_D$ 依存性を各々示す。Fig. 4 (a)において、 $V_D$ の上昇に伴いOFF電流が増加することがわかる。これはドレインの不純物濃度が高いために、ボディ-ドレイン間のトンネル長が低減し、バンド間トンネリング電流が生じたことが原因である。一方、Fig. 4(b)では、 $V_D=5\text{V}$ としてもオフ電流の増加が抑制可能であることがわかる。このことから、トンネルFETのOFF電流低減のためには、ドレインの不純物濃度を $10^{17}\text{cm}^{-3}$ 程度とし、ボディ-ドレイン間のトンネル長を伸ばす必要があることを確認した。

### 4. まとめ

トンネルFETの電気的特性におけるデバイスパラメータ依存性をシミュレーションにより検討を行った。その結果、ゲート酸化膜厚の薄膜化によりON電流が向上可能であること。一方、OFF電流低減のためには、ボディおよびドレインの不純物濃度を各々 $10^{18}\text{cm}^{-3}$ 、 $10^{17}\text{cm}^{-3}$ 程度以下にすることが必要であることを明らかにした。

### 謝辞

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。また、JSPS 科研費 JP16K18094の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] 岩波悠太：「トンネルFET作製に向けたリン拡散条件の検討」，平成28年度卒業論文
- [2] 呉研，他：「トンネルFETに対する放射線影響およびSi系ヘテロ接合におけるON電流向上効果」，平成26年度日本大学理工学部学術講演会，C - 1，2016 - 12.

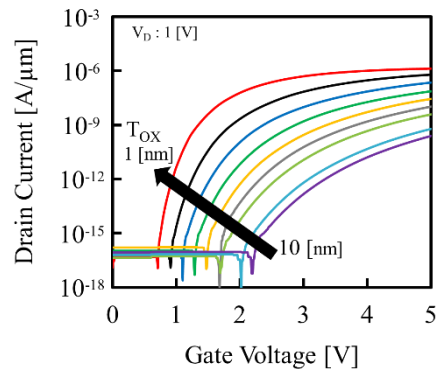


Fig. 2 Oxide thickness dependence on  $I_D$ - $V_G$  characteristic

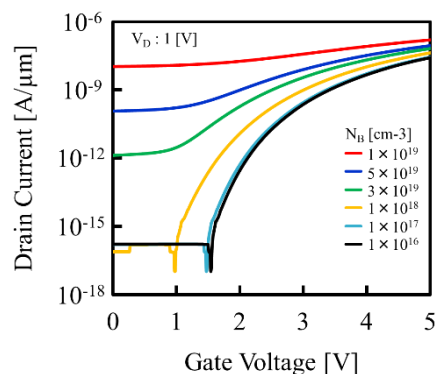
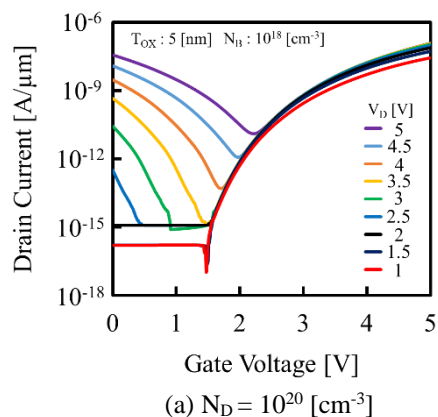
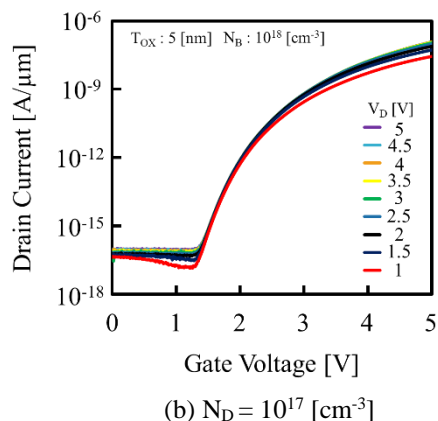


Fig. 3 Body doping concentration dependence on  $I_D$ - $V_G$  characteristic



(a)  $N_D = 10^{20}\text{cm}^{-3}$



(b)  $N_D = 10^{17}\text{cm}^{-3}$

Fig. 4 Drain Voltage dependence on  $I_D$ - $V_G$  characteristic