

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：32665  
研究種目：若手研究(B)  
研究期間：2016～2017  
課題番号：16K18094  
研究課題名(和文)耐放射線照射性に優れた新規トンネルFETの動作実証

研究課題名(英文) Heavy-ion induced current in Tunnel FET

研究代表者

呉 研 (WU, Yan)

日本大学・理工学部・助手

研究者番号：80736455

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではデバイスシミュレーションを用いてTFETの耐放射線効果の評価を行い、TFETの単体動作時、CMOS動作時に放射線照射を受けた場合、重イオン照射によって誘起電流及び出力電圧の低下が確認でき、これらはTFETのpin構造が寄生バイポーラ効果を抑えたことによることが確かめられた。また、本研究最大の目的であるpin構造を有する単体TFETと従来型MOSFETを同条件で作製し、デバイスが照射によって過渡現象の観察、電流発生は観察でき、代表的なデータからTFET単体の誘起電流発生量が従来型MOSFETに対して低減された結果を見て取れる。

研究成果の概要(英文)：This study focused TFET as a radiation hardened device. The TFET has been developed to improve the sub-threshold slope, and is consisted by p-i-n type, as source-channel-drain region, with applying reverse bias. So it is expected that the radiation induced electrons and holes in channel region are drifted to drain and source, respectively, and that the parasitic bipolar effects can be reduced by TFET. We evaluated the heavy-ion induced transient current and collected charge in conventional FET and TFET, and also discussed the single event transient on TFET CMOS devices.

研究分野：電子デバイス

キーワード：TFET 重イオン照射 SOI構造 寄生バイポーラ効果

1. 研究開始当初の背景

バルク型 MOSFET に重イオン等の高エネルギー放射線が照射されるとデバイス内にて誘起電荷が発生し、その一部が電極に収集される様子を図 1(a)に示す。この電荷が収集され、過渡電流(図 1(c))となり、演算回路ノード電位の過渡的降下、メモリ回路においてメモリ状態の反転などのソフトエラーが発生させる。誘起過渡電流ピーク値と持続時間、つまりその積分値である収集電荷量を減らし、放射線耐性のあるデバイス開発が望まれる。これまで、従来型 MOSFET のソフトエラー耐性に優れたデバイスとして、SOI (Silicon On Insulator) 構造を持つ基板を用いて、放射線照射によって発生するキャリアの収集領域を制限させ、薄い活性層において発生した電荷のみが収集に寄与する技術が開発された(図 1(b))。しかし、デバイスの微細化に伴い、特に SOI-NMOSFET が放射線を照射された場合、照射により発生した以上の収集電荷量が観察されている(図 1(d))。デバイスの微細化が進むと、発生電荷に対して狭くなった活性層で発生した電荷のうち、電子はドレインに収集されるものの、正孔は Body 領域に蓄積することによりチャネル電位が上昇する(図 2(a))。

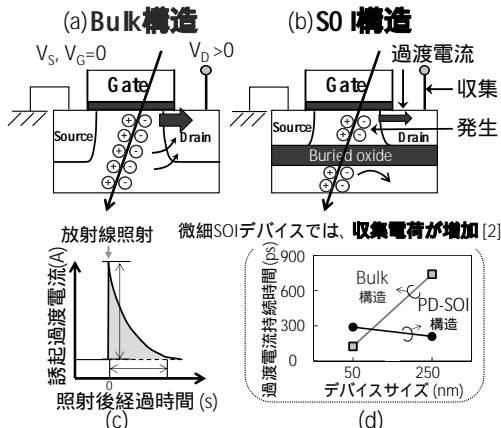


図 1 従来型の SOI 構造 MOSFET とバルク構造 MOSFET に対して放射線照射による発生電荷の収集・過渡電流のイメージ

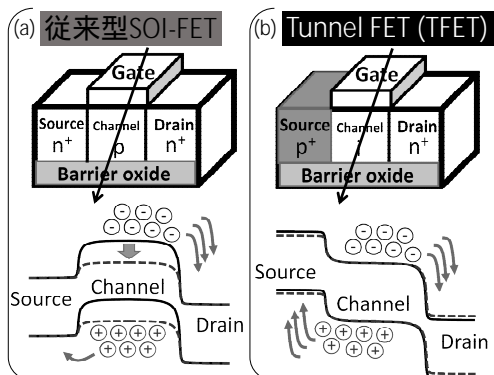


図 2 従来型 SOI-FET (a) と TFET (b) の構造及び照射によるバンド変化図 (実線-照射前、点線-照射後)

この効果によって Source/Body/Drain で構成される寄生バイポーラが ON となる現象が報告され(図 2(a))、SOI デバイスでは従来バルクデバイスより大きな過渡電流が流れ、バルクデバイスよりも SEU 耐性が低下する(図 1(d))。これは寄生バイポーラ効果と呼ばれ、耐放射線性に優れていると思われた SOI-FET デバイスが短チャネル化によって、放射線照射誘起エラーを増やす方向に働かせる。一方、トンネル FET (TFET) の Source/Body/Drain は p/i/n 形により構成されており(図 2(b))、照射により発生した電子・正孔が速やかに Source/Drain に収集されると考えられ、寄生バイポーラ効果の抑制が期待できる

2. 研究の目的

TFET デバイスの耐放射線性強化技術に着目し、「低電圧駆動が可能で、放射線照射誘起した過渡エラーが小さなトランジスタデバイス」を目指す。TFET は一方向なポテンシャル傾きを持ち、電荷蓄積領域がないため、デバイスに対して照射実験とシミュレーションを以って寄生バイポーラ効果は発生しない、過渡的エラーを極小にできること、耐放射線性に優れることを実証すること。本研究は、新規半導体デバイスによる放射線起因ソフトエラー抑制効果の実証を目的とする。ソフトエラー耐性に優れたデバイスとして SOI-MOSFET デバイスが提案されているが、微細化と共に寄生バイポーラ効果によるエラー発生率が顕著となった。照射により発生した電荷以上の電荷収集が起こり、ソフトエラー発生を促進させることが原因である。本研究では、新規デバイスであるトンネル FET (TFET) の照射効果に着目した。TFET は従来型デバイスに比べて、ソースドレイン方向に PiN 構造を持ち、OFF 状態において一方的なポテンシャル傾斜を有しており、照射により発生した電子と正孔が速やかに Source/Drain に収集されるため、寄生バイポーラ効果の抑制が期待される。さらに、TFET 及び従来型 SOI-MOSFET を作製し、双方に対して重イオン照射誘起電流を観察およびシミュレーション結果との比較により、トンネル FET の寄生バイポーラ効果抑制現象(シングルイベント効果抑制)について評価する。

3. 研究の方法

重イオン照射誘起過渡電流およびその照射位置依存性に対し、デバイスシミュレーションの結果と比較・検討することにより TFET によるソフトエラー耐性向上を実証し、省電力でかつ放射線耐性に優れたデバイスの実現を目指す。照射デバイスは簡

単化のため、ゲートなし構造を用いて定電圧を印加した状態でトンネル FET および SOI-MOSFET を作製し、それぞれに対して重イオン照射を行い、照射により誘起されるドレイン電流波形を測定する。また、照射領域を限定するためにコリメートビーム、またはマイクロビームを使用しビーム径を数十  $\mu\text{m}$  程度とし、かつ、多重照射防止のためビーム内の照射粒子数を 100 ion/s として連続的に照射誘起過渡電流を観測した。

#### 4. 研究成果

デバイスシミュレーション結果を示す。ゲート長 250 nm の MOSFET 及び TFET により構成された CMOS インバータにおいて、 $V_{\text{dd}} = 1.5$  V、ゲートバイアスを OFF 状態とし、nMOS のチャンネル中央に  $\text{LET} = 10 \text{ MeVcm}^2/\text{mg}$  の重イオンを照射した際 (SOI 層にて 52 fC の電荷発生) の  $V_{\text{out}}$  の変化を評価した。図 3 に計算結果を示す。従来型 MOSFET では、 $V_{\text{out}}$  の反転が約 0.5 ns の間観測されたのに対して、TFET では  $V_{\text{out}}$  の電圧低下が抑えられ、寄生バイポーラ効果の抑制が確認された。

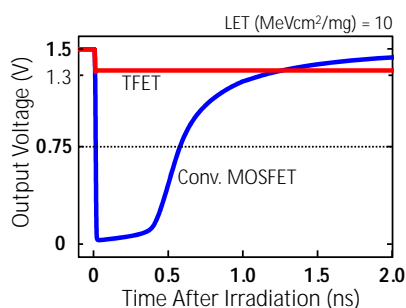


図 3 重イオン照射誘起  $V_{\text{out}}$  低減パルスの時間的変化 ~ TFET 及び従来型 MOSFET の比較 ~

図 4 に MOSFET 及び TFET において単体の耐放射線性を示す。それぞれチャンネル長 1  $\mu\text{m}$ 、Source/Drain 領域不純物濃度  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、Body 不純物濃度  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、 $V_{\text{D}} = 0.5$  V、ゲートバイアスを OFF 状態とし、チャンネル中央に  $\text{LET} = 10 \text{ MeVcm}^2/\text{mg}$  の重イオンが照射 (SOI 層にて 52 fC の電荷発生) された際の過渡電流及び収集電荷量を評価した。従来型では照射後 1 ns 程度まで大きな電流が観測されたのに対し、TFET では短時間で電流が減衰しており、照射誘起発生電荷が速やかに排除できたことを示している。また、従来型では寄生バイポーラ効果により発生電荷量以上の電荷収集が見られたのに対し、TFET の収集電荷量は発生量程度となり、寄生バイポーラ効果の抑制が確認された。

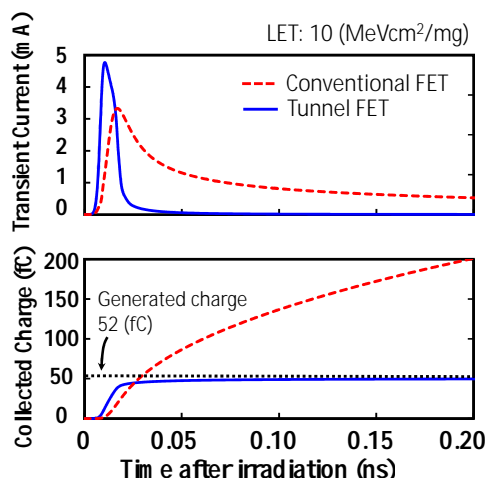


図 4 MOSFET 及び TFET の過渡電流及び収集電荷量の時間的変化

さらに、TFET はその構造上、Drain-channel 間に大きな OFF 電流を引き起こす強烈なアンバイポーラ効果に対して、LDD 構造が有効であることも知られている。シミュレーションによりと TFET において LDD 構造を有する場合、放射線照射誘起電圧降下について検討した。

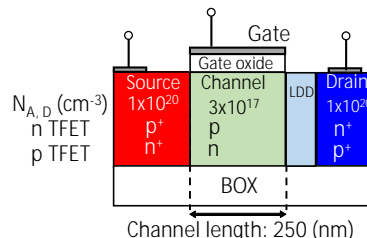


図 5 LDD 構造を有する TFET デバイス

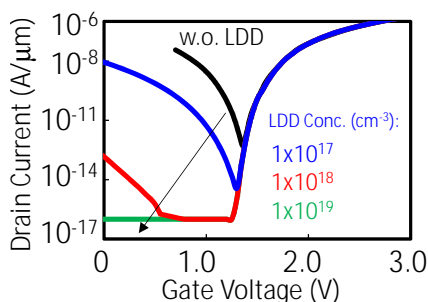


図 6 LDD 構造を有する TFET.  $I_{\text{d}}-V_{\text{G}}$  特性

図 5 に回路デバイス構造を示す。TFET 単体及びベース CMOS 回路を Sentaurus TCAD においてチャンネル長 250 nm、Source/Drain 領域不純物濃度  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、Body 不純物濃度  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、LDD 領域の濃度を図 6,7 のように設定し、図 6 に LDD 構造を有する TFET 単体デバイスの結果を示す。LDD 領域の濃度を上げるに従って OFF 電流が減少し、アンバイポーラ効果を低減させることができた。CMOS 回路の重イオン照射の結果を示す。一方、 $V_{\text{dd}} = 1.5$  V、入力を "0" 状態とし、nMOS チャンネル中央に

LET=10 MeVcm<sup>2</sup>/mg の重イオンが照射 (SOI 層にて 52 fC の電荷発生)された際の CMOS 回路の nMOS に対して過渡電流、出力電圧降下パルスの評価した。図 7 に計算結果を示す。LDD 領域不純物濃度を増やすと V<sub>out</sub> の過渡降下が V<sub>dd</sub>/2 まで大きくなった。以上より、LDD 濃度を増やせば OFF 電流を下げられるが、耐放射線性においては、V<sub>out</sub> 降下増大のトレードオフがあることがわかった。

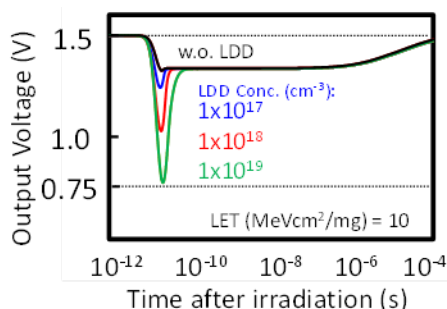


図7 V<sub>out</sub>の過渡低下の時間的变化～LDD 構造を有する TFET～

MOSFET および TET の照射実験において、加速電圧 107MeV の Ar イオン(サイクロ)照射実験の結果、代表的な過渡電流波形において、TFET における誘起電流ピーク値、電流持続時間共に、従来の MOSFET に比べて大幅に抑制されていることを確認した。これは、TFET により寄生バイポーラ効果の抑制が可能であることを示唆する結果である。現在、得られた多数の過渡電流波形の統計的な処理を実施しており、これらの結果の有意性について検討を進めている。また、シミュレーションによるバックゲート構造における重イオン照射誘起電流との比較も行い、TFET による寄生バイポーラ効果抑制について検討を進める。ただし TFET は、従来の MOSFET に比べ駆動電流が小さいという欠点も有しており、駆動電流の改善も含み、耐放射線性デバイスとしての可能性について検討を続ける予定である。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

和田雄友、呉研、高橋芳浩

微細 SOI デバイスの重イオン照射誘起寄生バイポーラ効果抑制  
日本信頼性学会誌 145-153, 2016 年 査読あり

〔学会発表〕(計 4 件)

Wu Yan, Yoshihiro Takahashi

The Impact of Tunnel FET on Heavy Ion Induced Transient Effect  
232nd ECS Meeting 2017

Wu Yan, Kuniyuki Kakushima, Yoshihiro Takahashi

Formation of Magnesium Silicide for Source Material in Si based Tunnel FET by Annealing of Mg/Si Thin Film Multi-Stacks IJWJT 2017

呉研、高橋芳浩

LDD 構造を用いたトンネル FET ベース CMOS 回路における耐放射線性評価  
第 78 回応用物理学会秋季講演会 2017

呉研、高橋芳浩

トンネル FET ベース CMOS 回路のシングルイベント耐性  
第 86 回応用物理学会春季講演会 2017

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

呉研 (WU, Yan)

日本大学・理工学部・助手

研究者番号 : 80736455

(2)研究協力者

岩波悠太 (IWANAMI, Yuta)