

Mg₂Si/Si ヘテロ接合トンネルダイオードに関する検討

Study on the electrical characteristics of Mg₂Si / Si heterojunction tunnel diode

○山口直弥¹, 唐鎌亮太¹, 三田梓郎¹, 岸佳佑¹, 菅瑛斗², 中野雄介², 呉研³, 高橋芳浩³

* Naoya Yamaguchi¹, Ryota Karakama¹, Shiro Mita¹, Keisuke Kishi¹,
Eito Kan², Yusuke Nakano², Yan Wu³, Yoshihiro Takahashi³

Abstract: In order to increase the ON current of Tunnel FET, electrical characteristics of Mg₂Si/Si heterojunction diode is investigated. It was found that the tunnel current was larger than the current of Si/Si junction due to the band offset between Mg₂Si and Si.

1. 序論

近年の半導体デバイスには低消費電力化が求められている。従来の MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) では、キャリア注入が拡散によるため原理的に S 値を 60 mV/dec. 以下にすることは出来ないため、電源電圧の低減に伴い、待機時のリーク電流が増加し、消費電力が増大する。よって、更なる低消費電力化には急峻な立ち上がり特性を有するデバイスが必要となっている。その有力候補の一つが TFET (Tunnel FET) である。TFET は従来の MOSFET とは異なり、Source, Drain に異なる不純物原子を導入することでデバイスが形成され、Gate 電圧印加により Source から Body へキャリアをトンネル効果により注入することにより動作する。このため、60 mV/dec. 以下の S 値が達成でき、待機時の低消費電力化が可能となる。しかし、トンネル効果を利用しているため、Source-Body 間のトンネル障壁により ON 電流が低くなるといった問題点がある。一方、バンドオフセットを有する材料を用いた接合により ON 電流が増大することが明らかになっている (Fig.1)。各種半導体のエネルギーバンドを Fig.2 に示す^{[1][2]}。Mg₂Si は Si に対して正方向のポテンシャルオフセットを持つことから、Mg₂Si/Si ヘテロ接合を Source-Body 接合に用いることにより、Si/Si ホモ接合よりも大きなトンネル電流が得られることが考えられる。そこで本研究では Mg₂Si/Si ヘテロ接合ダイオードのトンネル電流についてデバイスシミュレーションを用いて検討を行った。

2. デバイスシミュレーション

Fig.3に計算モデルを示す。ダイオードの幅 (W) : 250 nm, 奥行き (L) : 1000 nm, p⁺領域の濃度 : N_a=1×10²⁰ cm⁻³, n領域の濃度 : N_d=1×10¹⁷ cm⁻³と設定し、p⁺-Si/n-Si接合および p⁺-Mg₂Si/n-Si接合の逆バイアス時 (V_A<0) の電流-電圧特性を評価した。

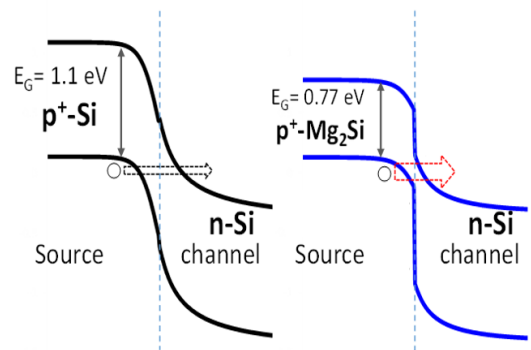


Fig. 1 Energy band structure of p⁺-Mg₂Si/n-Si and p⁺-Si/n-Si junctions

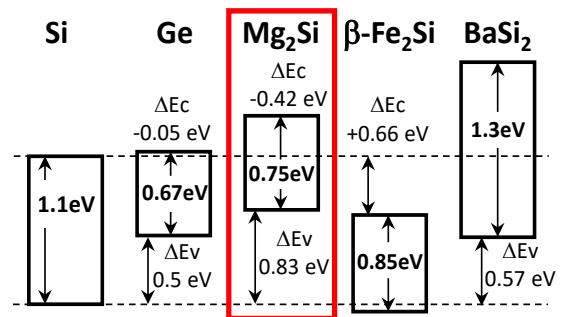


Fig. 2 Energy band structure of semiconductor materials

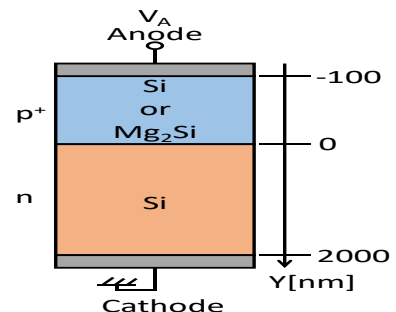


Fig. 3 Simulation model for diode

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.4 に各ダイオードの逆方向特性の計算結果を示す。Mg₂Si/Si接合では、Si/Si接合に比べて小さな逆方向降伏電圧V_Zとなり、かつ印加電圧に対して急峻に電流が増大することを確認した。

本結果について検討するためトンネル長を評価した。本研究においてトンネル長は、Fig.5に示すように電子電流、正孔電流密度が飽和値の各々1/2になる位置間の距離と定義した。Fig.6に実効印加電圧とトンネル長との関係を示す。ここで実効印加電圧は、実際の印加電圧V_Aから逆方向降伏電圧V_Zを差し引いた値である。結果より、Mg₂Si/Si接合では、Si/Si接合と比較して、同実効印加電圧においてトンネル長が短くなることわかる。このトンネル長低減はバンドオフセットによるものであり、これによりトンネル抵抗が低減可能になったものと考えられる。

Fig.7 にトンネル長とトンネル電流の関係を示す。トンネル電流の対数とトンネル長は、ほぼ直線的に変化することを確認した。トンネル電流は一般的に次式で示される。

$$J_t = \frac{\sqrt{2m^*}q^3E_pV_a}{4\pi^3\hbar^2E_g^{1/2}} \exp\left(\frac{-4\sqrt{2m^*}E_g^{3/2}}{3qE_p\hbar}\right) \quad (1)$$

m*:電子の有効質量 q:素電荷量 V_a:印加電圧 W_t:トンネル長 E_p:接合面電界 ħ:ディラック定数 E_g:バンドギャップ
ここで、接合面電界E_pはトンネル長W_tの逆数に比例すると考えられることから、次式のようにトンネル長とトンネル電流との関係が得られる

$$\log J_t \propto -BW_t \quad (2)$$

ここで式(1)より係数Bは、材料のバンドギャップE_gに大きく依存することが分かる。すなわち、Fig.7におけるMg₂Si/Si接合とSi/Si接合との傾きの差は、Mg₂SiとSiとのバンドギャップの差異によるものと考えられる。

4. まとめ

TFETのON電流向上を目的に、Mg₂Si/Siヘテロ接合およびSi/Siホモ接合によるトンネルダイオードの逆方向特性について評価した。その結果、Mg₂SiとSiとのバンドオフセットによりMg₂Si/Siでは小さな逆方向電圧で大きなトンネル電流を得られることを確認した。今後、Mg₂SiのTFETへの適用について検討する予定である。

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。

参考文献

- [1] 唐鎌亮太, 他:平成30年度応用物理学会, 20a-PA4-7, 2018.9
- [2] Y.Wu, 他: International Workshop on Junction Technology (IWJT) P. 83 -84, 2017

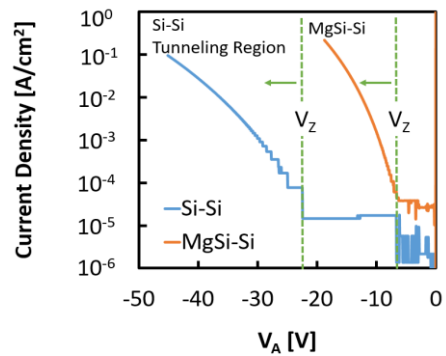


Fig. 4 Current density dependent to reverse bias

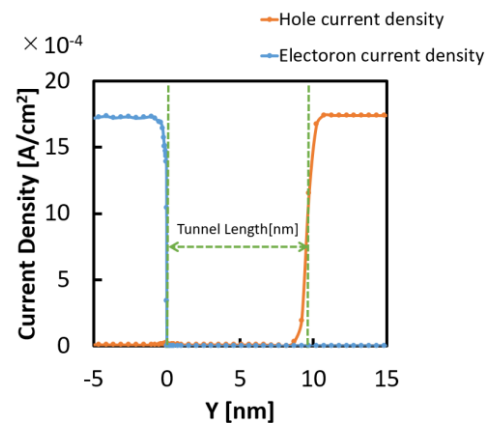


Fig. 5 Current density dependent to reverse bias normalized by tunneling injection region

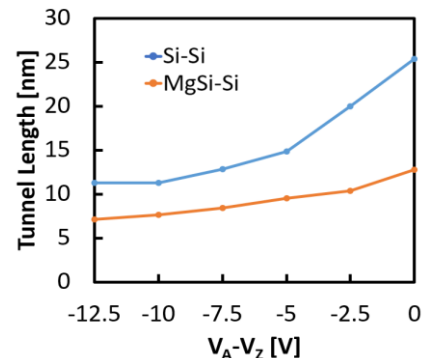


Fig.6 Tunnel versus effective applied voltage

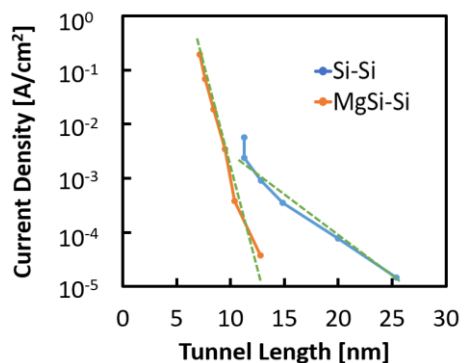


Fig.7 Relationship between tunnel length and current density under reverse bias