

[15018]

先端半導体材料とデバイスの放射線損傷

Radiation damages of leading edge semiconductor materials and devices

高倉健一郎^{#A)}, 角田功^{A)}, 米岡将士^{A)}, 杉山睦^{B)},
Kenichiro Takakura^{#A)}, Isao Tsunoda^{A)}, Masashi Yoneoka^{A)}, Mutsumi Sugiyama^{B)}

^{A)} National Institute of Technology, Kumamoto College

^{B)} Tokyo University of Science

Abstract

The 2-MeV electron irradiation effects of carbon (C) doped Si_{0.75}Ge_{0.25}/Si hetero junction diodes were investigated. The diode performances were evaluated using current-voltage (I/V) and capacitance-voltage (C/V) characteristics. From I/V characteristics, forward current improved by C doping, however, reverse current increased. The degree of degradation studied using damaged factors which determine the value ratio of before and after the electron irradiation. From the comparison with undoped and C doped diodes, degradation the reverse current of C doped diode remarkable. In contrast, forward current largely improved by C doping.

Keyword: guideline, layout, font

1. はじめに

1.1 半導体デバイスへの放射線照射効果

半導体デバイスの高性能化は微細化により進められている。加えて、デバイスの微細化が放射線環境下における電気特性の劣化軽減効果も得られることが知られており、民生デバイスの宇宙利用が期待され、放射線照射効果が調査されている^[1-3]。放射線の蓄積的な損傷・劣化 (Total Ionising Dose damage; TID damage) は原子炉、高エネルギー粒子加速器、人工衛星など、常に放射線に被曝する環境下で使用される電子機器では重要な課題である。集積回路の主たる構成要素である MOSFET においては、TID 劣化は、照射時にゲート絶縁膜に蓄積した電荷が素子劣化要因と考えられており、薄膜化に伴って蓄積電荷密度も減少するため、放射線照射の影響が少なくなると考えられている。しかし、集積回路の微細化を実現するためにゲート構造を三次元化 (Fin FET, Gate-All-Around FET; GAA FET) する手法が導入されており、今後の半導体デバイスに対しても TID 劣化は重要な検討要因として挙げられる。

1.2 半導体デバイスへの高移動度基板導入

さらに、FET の高度化を支える基幹技術としてチャネル移動度を向上させる歪 Si など高移動度基板の利用がある。歪 Si は、たとえば、歪緩和 SiGe バッファ層上に成長した非常に薄い Si (~10 nm) 膜により実現する。従来、SiGe バッファ層で形成される擬似基板の厚みは、およそ 1 μm 程度とされているが、薄膜化が試みられている。これは、製造コスト削減のためや SiGe は熱伝導率が低いため熱的性質を改善するためである。現状、低い貫通転位密度 ($N_D \sim 10^6 \text{ cm}^{-2}$) を実現した膜厚 300 - 400 nm 程度の SiGe バッファ層が利用されている。しかし、依然として擬似基板には電氣的に活性な貫通転移、ミスフィット転移が存在することも指摘されているのが現状である。

これら転移は、チャネル近傍でのソース・ドレインでの不純物拡散や、局所的な短絡経路の形成、オフ時のゲート漏れ電流誘起などの問題が懸念される。転移密度低減させるために SiGe バッファ層内に炭素を導入する試みがなされている。

一方、SiGe 系デバイスは高い放射線耐性をもつことが知られており、SiGe バッファ層の導入は、素子微細化とともに放射線耐性の高い半導体デバイスが実現することが期待できる。これらの背景の下、今回は特に放射線照射により SiGe バッファ層内に導入された欠陥と電気特性の関連について調査することを目的とした。そのために素子構造を単純化し、Si_{0.75}Ge_{0.25}/Si ヘテロ接合 (undoped) ならびに SiGe バッファ層に炭素層を導入した Si_{0.75}Ge_{0.25}:C/Si ダイオード (C doped) を対象デバイスとした。

2. 素子構造及び実験方法

2.1 素子構造

サブミクロンの CMOS プロセスを用いて、253 または 353 nm の SiGe バッファ層上に歪 Si 層を 8 nm 成長した。バッファ層の Ge 濃度は 25% である。バッファ層成長後、BOX 層により各素子を絶縁した。p⁺/n または n⁺/p 接合はイオン注入法を利用して形成した。導入量は $\sim 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 程度である。注入後、熱処理によりドーパントを活性化させた。接合深さは約 70 nm である。電極は接触抵抗を低下させるため、Ni を用いた。

2.2 実験方法

作製した素子の特性は電流 (I/V) ならびに静電容量 (C/V) により評価した。照射前後の I/V, C/V 特性を評価し、比較することにより実施した。放射線源として電子線を選択した。加速電圧を 2 MeV とし、照射量を 1×10^{13} から $1 \times 10^{15} \text{ e/cm}^2$ まで変化させた。照射時は室温、無バイアスの条件で実施した。

[15018]

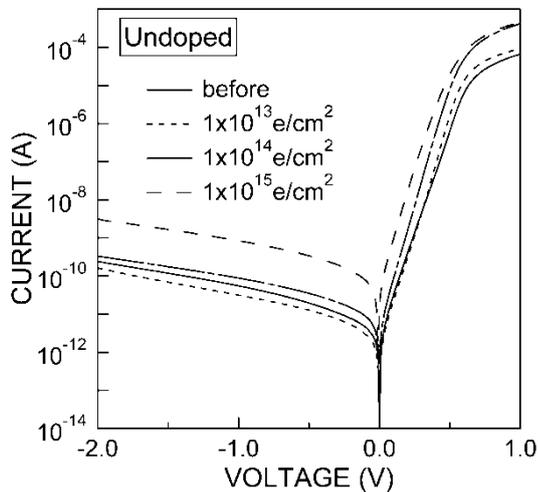
3. 結果と考察

3.1 電流電圧特性 (I/V 特性)

2 MeV の電子線照射前後の I/V 特性を図 1 に示す。照射前の理想係数を炭素添加の有無により、比較すると undoped 及び C doped ダイオードで 1.62 及び 1.12 であった。しかしながら、逆方向電流は炭素添加により増加している。理想係数は炭素を添加することにより小さくなっており、転移など pn 接合界面における再結合割合が炭素添加により緩和された可能性を示唆している。さらに、理想係数の大きさは電子線を照射しても変化することがなかった。

電子線照射による I/V 特性の劣化を定量的に評価するために、損傷係数(d_1)を定義する。逆方向電圧が

(a)



(b)

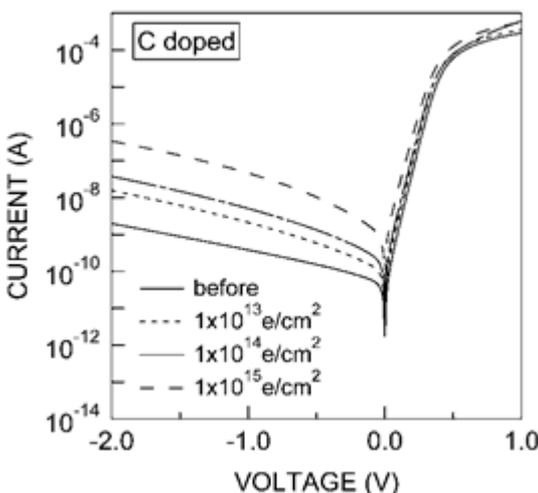


Figure 1. I-V characteristics of (a) undoped diode and (b) C doped diode before and after 2 MeV electron irradiation.

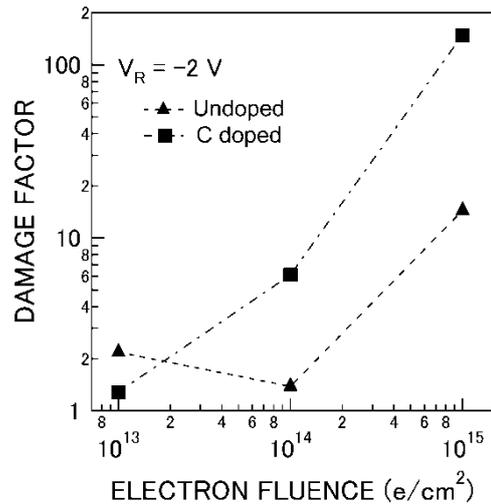


Figure 2. Damage factor of the drain current (d_1) for SiGe/Si diodes after the electron irradiation.

$V_R = -2$ V における照射前後の電流比を以下のように定義する。

$$d_1 = I_{R \text{ after}} / I_{R \text{ before}} \quad (1)$$

ここで、 $I_{R \text{ after}}$ 及び $I_{R \text{ before}}$ は照射後及び照射前の逆方向電流 ($V_R = -2$ V) である。電子線の照射量が 1×10^{13} e/cm^2 のとき、 d_1 はいずれの素子も小さく、照射による逆方向電流の変化量が小さいことを示している。しかし、照射量が大きくなると、 d_1 は増加した。照射量が 1×10^{15} e/cm^2 になると、C doped ダイオードの d_1 は undoped に比べて一桁大きくなった。炭素添加により、照射後の漏れ電流が大きくなったことを示唆しているが I/V 特性だけでは原因を特定することはできない。

3.2 静電容量電圧特性 (C/V 特性)

pn 接合ダイオードの C/V 特性は、接合界面に形成される空乏層の情報を含み、照射による影響を解析することが可能である。そこで、照射前後の両デバイスの C/V 特性を測定した。C/V 特性より空乏層中に存在する空間電荷密度を見積もることが可能である。電子線照射により電氣的に活性な不純物密度または欠陥密度が変化すると、空間電荷密度が変化するため、C/V 特性に現れてくる。そこで、I/V 特性と同様、 $V_R = -2$ V における空間電荷密度の照射前後の比を d_c と定め、以下のように定義した。

$$d_c = N_{\text{after}} / N_{\text{before}} \quad (2)$$

ここで、 N_{after} 及び N_{before} は、それぞれ照射後及び照射前の空間電荷密度である。図 3 に電子線照射量に対する d_c の変化を示す。照射により d_c は単調に減少している。これは、照射により空間電荷が減少したためであり、空乏層が広がり、逆方向電流が増加した原因になったことを示唆している。炭素が関連した照射導入欠陥が空乏層を広げている原因と考えられるが、現段階で、具体的なモデルを構築するにはいたっていない。今後、詳細な解析を進め、明らかにする必要がある。

[15018]

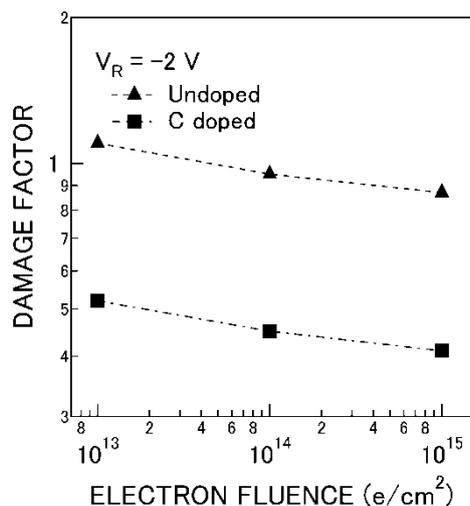


Figure 3. Damage factor of carrier density (d_C) for SiGe/Si diodes after the electron irradiation.

しかし、逆方向電流が大きく変化する照射量は $1 \times 10^{15} \text{ e/cm}^2$ であり、対象デバイスは宇宙空間などを想定した実使用環境で十分に適用可能であると結論できる。

4. 結論

炭素を添加した SiGe/Si ダイオードの放射線照射効果を評価した。炭素添加により素子の順方向特性は改善された。しかし、電子線照射により逆方向電流の増加量は炭素を添加した方が大きく、劣化しやすくなったといえる。C/V 特性を評価した結果、pn 接合界面の空間電荷密度が減少したことが原因と示唆された。今後、照射導入欠陥の種類を特定すべく詳細な解析を進める。

参考文献

- [1] P.R. Rao, X. Wang and A.J.P. Theuwissen: *Solid-State Electronics*, **52**, 1407 (2008).
- [2] H.J. Barnaby, M. McLain and I.S. Esqueda: *Nucl. Instr. and Methods*, B **261**, 1142 (2007).
- [3] H.L. Hughes and J.M. Benedetto: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **50**, [3] 500 (2003).