高い放射線耐性を有する半導体素子の開発

Development of semiconductor devices with high-radiation hardness

高倉健一郎#, 角田功, 米岡将士, Kenichiro Takakura[#], Isao Tsunoda, Masashi Yoneoka National Institute of Technology, Kumamoto College

Abstract

Owing to their low dark current, high transparency, high thermal conductivity, and potential radiation hardness, there is a special interest in silicon carbide (SiC) devices for radiation monitoring in radiation harsh environments and with elevated temperatures and, especially, for the plasma diagnostic systems in future nuclear fusion reactors. In this work, four-quadrant p-n junction diodes produced on epitaxial 4H-SiC substrates are studied. The impact of electron, neutron, and proton irradiations up to fluences of 1×10^{16} e/cm² on the electrical characteristics is studied by means of current–voltage (I–V) and capacitance–voltage (C–V) techniques.

Keyword: semiconductor radiation detectors, SiC, Radiation hardness

1. はじめに

1.1 研究背景

半導体放射線検出器は、空間およびエネルギー分 解能が高く、優れた性能を有することから高エネル ギー物理、宇宙空間、医療、放射線および防衛分野 など、広く利用されている[1]。主流のシリコンデバ イスとは別に、炭化ケイ素デバイスは、より広いバ ンドギャップエネルギー(4H-SiCでは3.27 eV)とよ り高い原子変位閾値エネルギー(Cでは21 eV、Siで は35 eV)を持つため、温度変化や光の影響を受けに くく、放射線耐性も高い可能性があることから、こ れらの用途で注目されている。

そのため、近年では、想定される用途に向けて、 SiC 技術に対する放射線の影響を研究することへの 関心が高まっている。研究のほとんどは、基本的な ショットキーダイオード構造に集中している。本研 究では、エピタキシャル SiC 上に作製した SiC ショ ットキーダイオードについて、極薄 (10 μ厚) および 高抵抗のバルク Si 基板の両方に対するベンチマーク を行った。また,電子線,中性子線,陽子線を照射し て,電気的特性の耐放射線性を調べた。

1.2 研究方法

対象とする素子は、IMB-CNM-CSIC のクリーンル ームで作製した,高抵抗シリコン基板と炭化ケイ素 基板上に p-on-n 4H-SiC ダイオードである。5×10¹⁵ cm⁻³でドープされた 30 µm 厚の n型エピ層を有する 4H-SiC 基板上に Al を注入することで pn 接合ダイオー ドを形成した。

これらのデバイスの耐放射線性を評価するために, 電子線,中性子線,陽子線を照射した。2 MeV 電子 線は高崎 QST 電子加速器で照射した。中性子照射は スロベニアのリュブリャナにある JSI TRIGA 研究炉 で,24 GeV/c 陽子照射はスイスのジュネーブにある CERN PS-IRRAD 施設で行った。

電流-電圧 (I-V) および静電容量-電圧 (C-V) 測定

は, Cascade Summit 11000B-M プローブステーション において, HP 4155B 半導体パラメータアナライザと Agilent 4284A LCR メータを用いて,室温で実施した。 C-V 測定の周波数は、0.1kHz~1000kHz とした。

2. 結果と考察

2.1 I-V 特性

図1は、電子線の照射量を変化させたエピタキシ ャルSiCダイオードのI-V特性を示しいる。放射線 による順方向の電流減少が観察された。この現象は、 直列抵抗の増加と関連している。抵抗値の増加は、 放射線によって誘発された点欠陥によってキャリア が捕獲され、キャリア密度が変化することに起因す ると考えられる。電子線照射後のオン抵抗の増加は、 主に、炭素空孔(V_c)、シリコン空孔(V_{si})、V_c+V_{si} 複合体などの放射線誘起欠陥の形成によるキャリア 再結合寿命の減少に起因するとされている[2,3]。

生成-再結合中心の形成は、リーク電流増加の原因 となる。図2は、一定の逆バイアス条件(25V)にお ける逆電流の照射量依存性を示したものである。リ ーク電流損傷率(α)は7.9×10⁻¹⁹ A/cm となった。1 MeV の中性子に対する2 MeV の電子の非電離エネルギー 損失(NIEL)を考慮すると、得られた値は照射 Si に 関する報告結果の範囲内である[4]。電子線を照射し た SiC デバイスの場合,リーク電流損傷率=9.2×10⁻²⁴ A/cm に対して5 桁近い低い値が得られている。

中性子線および陽子線を照射したバルクSiおよび 10 μ 厚のSiデバイスでは、最も低い照射量(それぞ れ 5×10¹³ n/cm²および8.6×10¹³ p/cm²)で約2桁のリ ーク電流増加が見られ、より高い中性子線および陽 子線の照射量では、僅かに増加した。中性子と陽子 を照射したバルクSiデバイスでは、それぞれ3.8×10⁻¹⁷ A/cmの値が得られたが、これは、 報告された結果の範囲内である[4]。

[20016]

[20016]



Figure 1. Diode current-voltage characteristics measured for epitaxial SiC diodes at different irradiation fluences.



Figure 2. Reverse current measured for bulk Si and 10 μ m-thick Si and for epitaxial SiC diodes at different electron, neutron and proton irradiation fluences (measured at 5 V for both, bulk Si and 10 μ m-thick Si devices, and at 25 V for epitaxial SiC diodes).

2.2 C-V 特性

図3は、電子線の照射量を変えて、エピタキシャル SiC ダイオードの C-V 特性を測定したものである。 I-V の結果と同様に、1×10¹⁵ e/cm²の照射量までのデバイスでのみ、ダイオードのような C-V 特性が観察 された。中性子と陽子を照射したデバイスの場合も 同様に、最も低い照射量でのみ、ダイオードのよう な C-V 特性が維持された。電子、中性子、陽子の最 高照射量では、約25 pF の固定容量を持つ平坦な C-V 曲線が得られた。

図4は、エピタキシャルSiCダイオードの有効な ドーピング濃度を示したものである。電子線、中性 子線、陽子線の最低照射量データからキャリア除去 率を抽出すると、それぞれ0.72 cm⁻¹、19.8 cm⁻¹、9.3 cm⁻¹となった。高エネルギーの陽子によるダメージ と比較すると、SiCではSiよりも中性子によるダメ ージがやや大きいようである。得られたキャリア除 去率は、電子線および中性子線を照射した4H-SiCシ ョットキーバリアに関する過去の推定値[5,6]の範囲 内である。

3. まとめ

SiC ダイオードを,エピタキシャル SiC, 極薄 (10 μ) ・高抵抗のバルク Si 基板上に作製した。電



Figure 3. Capacitance-voltage characteristics measured at 10 kHz for zepitaxial SiC diodes at different electron irradiation fluences.



Figure 4. Extracted effective doping concentration (N_{dop_eff}) (at 5 µm depth) for epitaxial SiC diodes at different (a) electron, (b) neutron and (c) proton irradiation fluences.

子線、中性子線、陽子線の照射がダイオードの電気 的特性に与える影響を分析した。その結果、すべて の照射を受けた SiC デバイスの逆電流は小さく、最 も高い照射量では整流特性が失われることがわかっ た。

参考文献

- G. Lutz, Semiconductor radiation detectors, 2nd ed. Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2007.
- [2] P. Dong, et. al., "Electron radiation effects on the 4H-SiC PiN diodes characteristics: an insight from point defects to electrical degradation," IEEE Access, vol. 7, pp. 170385-170391, 2019.
- [3] F. Nava, et. al., "Radiation detection properties of 4H-SiC Schottky diodes irradiated up to 10¹⁶ n/cm² by 1 MeV Neutrons," IEEE T. Nucl. Sci., vol. 53, no. 5, pp. 2977-2982, 2006.
- [4] G. Lindström, et al., "Radiation hard silicon detectors -Developments by the RD48 (ROSE) collaboration," Nucl. Instrum. Meth. A, vol. 466, no. 2, pp. 308-326, 2001.
- [5] P. Hazdra, and J. Bovecký, "Radiation Defects Created in n-Type 4H-SiC by Electron Irradiation in the Energy Range of 1–10 MeV," Phys. Status Solidi A, vol. 216, pp. 1900312, 2019.
- [6] S. Seshadri, et. al., "Demonstration of an SiC neutron detector for high-radiation environments," IEEE T. Electron. Dev., vol. 46, no. 3, pp. 567-571, 1999.