

Ni/4H-SiC SBD电离辐照探测器的实验研究

张林, 肖剑, 邱彦章, 程鸿亮

(长安大学电子与控制工程学院 西安 710064)

【摘要】研制了Ni/4H-SiC肖特基二极管电离辐照探测器, 并采用不同的辐照源进行了测试。实验结果表明, 对于低能电子和 γ 射线辐照, 该探测器都有比较灵敏的电流响应。经过1 Mrad(Si)的 γ 射线辐照后, 探测器的信号电流没有明显退化; 分别经过1 Mrad(Si)的 γ 射线和100 Mrad(Si)的1 MeV电子辐照后, 0 V和-30 V辐照偏压下的探测器的暗电流仅有较轻微的退化。说明了该文研制的探测器具有暗电流低、灵敏度高和抗辐射容限高等优点, 可以在强辐射环境中长时间应用。

关键词 电离; 辐照探测器; 肖特基; 碳化硅

中图分类号 TL8

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.03.028

Experiment Study of Ni/4H-SiC Schottky Diode Ionization Radiation Detector

ZHANG Lin, XIAO Jian, QIU Yang-zhang, and CHENG Hong-liang

(School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University Xi'an 710064)

Abstract The Ni/4H-SiC Schottky diode ionization radiation detector was fabricated and measured with different radiation sources. Under radiation from ^{63}Ni and gamma-ray, the detectors show sensitive current response. After 1 Mrad(Si) gamma-ray radiation, the signal current has no obvious degradation. After 1 Mrad(Si) gamma-ray and 100 Mrad(Si) electron radiation respectively, the dark current of detectors under different radiation bias voltage has slightly degradation. The results show that Ni/4H-SiC Schottky diode ionization radiation detector has low dark current, high sensitivity and high radiation hardness and can be applied in high radiation environment for a long time.

Key words ionization; radiation detector; schottky; SiC

电离辐照探测器在军事、航天、医学、高能物理实验等领域都有着重要的应用。目前常用的Si基的辐照探测器不但会在强辐照环境中退化, 而且难以在高温环境下工作^[1]。SiC具有本征载流子浓度低、临界击穿电场高、临界位移能高等优良特性, 是制备电离辐照探测器的理想材料。相比于SiC PN结, SiC肖特基二极管(SBD)由于具有器件结构简单、工艺成熟、表面死层薄等特性而备受关注^[2]。目前已有文献报道了Au/4H-SiC SBD辐照探测器^[3-4], 并取得了良好的性能。

Ni是目前工艺最成熟的SiC肖特基金属之一。Ni/SiC肖特基接触具有整流特性好、辐射辐照容限高^[5-7]等优良特性。现有的研究还表明, 温度升高对Ni/SiC的反向特性影响较轻微^[8]。这些特性使其很适于制作在恶劣环境下长期工作的辐照探测器。本文研制了Ni/4H-SiC SBD电离辐照探测器, 采用同质外

延技术生长了低掺杂有源区, 并采用 ^{63}Ni 同位素辐照源、 ^{60}Co γ 射线源和高能电子进行了测试。

1 器件制备

本文采用同质外延技术生长了工艺所需的外延材料, 设备为瑞典Epigress公司的VP508水平式低压热壁CVD系统。衬底为从德国SiCrystal.AG公司购买的Si面, 偏离(0001)面 8° 的2英寸n型4H-SiC单晶, 掺杂浓度约为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。外延样品生长温度为 1570°C , 压强为100 mbar, 外延层的厚度约 $10 \mu\text{m}$ 。采用非故意掺杂工艺获得低掺杂的n型外延层, 以获得低的暗电流和厚的灵敏区。高频CV测试获得外延层的净载流子浓度约为 $6.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。

经过标准的RCA清洗工艺后, 在材料背面电子束蒸发Ni/Pt(450/50 nm), 然后在氮中经过 1000°C 高温退火2 min形成欧姆接触, 再淀积Cr/Au(50/200 nm)。

收稿日期: 2010-08-19; 修回日期: 2011-05-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(CHD2012JC035)

作者简介: 张林(1981-), 男, 博士, 主要从事新型半导体功率器件和可靠性的研究。

在材料的外延面采用电子束蒸发Ni/Cr/Au (200/50/200 nm), 剥离形成肖特基图形, 器件的剖面结构如图1a所示。器件的SEM照片如图1b所示。器件制备完成后, 用激光切片机将样品切开, 将部分器件采用陶瓷管壳进行封装, 用硅铝丝键合。未封装器件用于后文的同位素辐照测试, 封装器件用于 γ 射线与电子辐照测试。

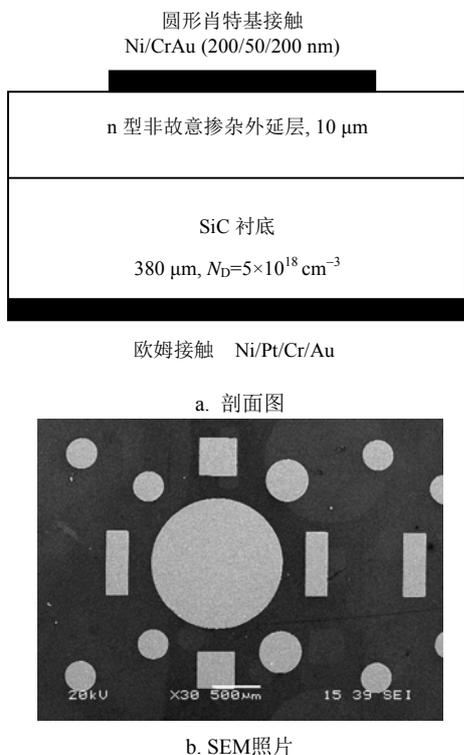


图1 Ni/4H-SiC SBD电离辐照探测器

2 测试与分析

2.1 信号电流测试

1) 同位素辐照测试

辐照源为 ^{63}Ni , 是纯电子辐射源, 半衰期约100年, 平均电子能量为17.4 keV, 放射强度为6 mCi。测试设备为Keithley 4200半导体参数分析仪和探针台。该辐照源是将 ^{63}Ni 镀在铜片上, 可以视为面辐照源, 面积约 2 cm^2 。测试时将SiC SBD置于探针台上, 辐射源置于其正上方约3 mm处。

从图2可以看到, 探测器的暗电流较小, 在 -200V 的反向偏压下仅为 $2.2 \times 10^{-9}\text{ A/cm}^2$ 。加入辐照源后, 探测器出现了明显的辐照生电流。在较低的反向偏压下, 信号电流随偏压增大而上升; 在较高的偏压下, 信号电流趋于饱和。这是由于随着外加偏压的上升, 探测器的灵敏区变厚, 收集辐照生电荷的能力上升^[9]。约 -40 V 时, 探测器将入射电子在SiC材料中产生的辐照生电荷完全收集。

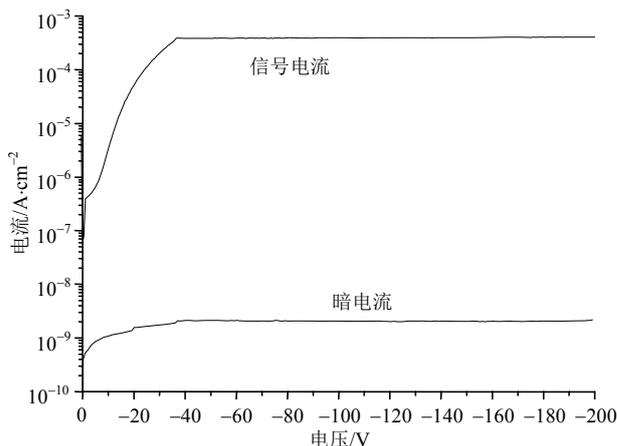


图2 ^{63}Ni 辐照下的电流特性

2) γ 射线辐照测试

γ 射线辐照试验在西北核技术研究所进行, 辐照源为 ^{60}Co , 剂量率约为 96.3 rad(Si)/s ($1\text{ Mrad(SiC)} = 1.03\text{ Mrad(Si)}$)^[10]。辐照试验在室温下进行, 在不同的累积总剂量下采用HP 4156 A和Agilent 34980A对器件进行在线测试和离线测试。在线测试过程中采用一根长约30 m的排线连接器件与测试设备。在辐照过程中, 采用直流电源MPS-3005LP-3对两种类型的部分器件分别加0 V和 -30 V 偏压。实验过程中没有发现器件有明显的升温, 最高累计总剂量为1 Mrad(Si)。

图3为不同累积量下的在线测试获得的探测器的信号电流。与前文的低能电子只会在几个微米的深度内激发电子空穴对不同, γ 射线会在整个器件中均匀地激发电子空穴对。因此, 从图中可以看到, 探测器的信号电流随着反向偏压的上升而增加。由于SiC材料具有较高的临界击穿电场(是Si材料的8倍), 对于 γ 射线等高能辐照粒子时, 可以让探测器工作在尽可能高的偏压下以提高探测器的灵敏度。

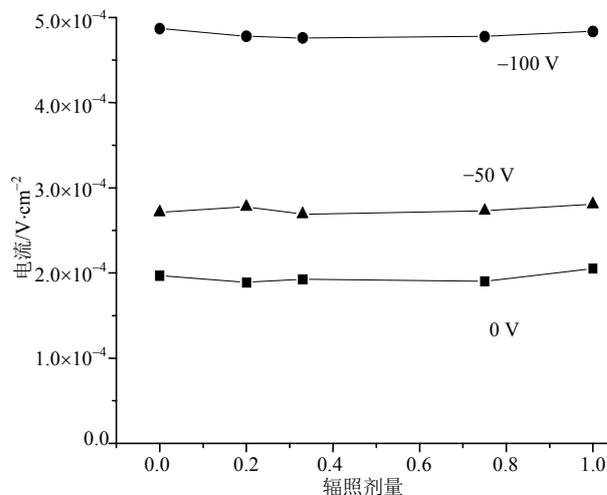


图3 γ 射线辐照下的电流特性

从图中还可以看到, 在1 Mrad(Si)的累积量内,

不同反偏压下的信号电流比较稳定, 没有表现出明显的退化, 显示了良好的抗辐射特性。在辐射环境最为恶劣的地球轨道(约为地球同步轨道的高度一半处), 航天器内部的年辐射剂量约达1 Mrad(Si)^[12], 即本文中的最高总剂量可以对应于空间环境中一年以上的电离辐照剂量。相比于Si基探测器经过几十戈雷辐照后就需要重新校对^[11], 本文研制的辐照探测器可以在强辐照环境下长期工作, 显示了巨大的应用潜力。

2.2 暗电流测试

为了获得更高灵敏度, 电离辐照探测器一般工作在较高的反偏压下, 本文采用 γ 射线和高能电子研究了不同反偏压下电离辐照探测器的退化效应。

1) γ 射线辐照测试

不同累积总剂量辐照后探测器的暗电流如图4所示, 经过0.2 Mrad(Si)的 γ 射线辐照后, 辐照偏压0 V的器件在-200 V时的反向电流从 $8.98 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 下降为 $8.03 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$; 辐照偏压-30 V的器件在-200 V的反向电流从 $4.23 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 下降为 $3.90 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 。但是随着辐照总剂量的继续增加, 反向电流不再有明显退化。先前的研究表明器件反向特性的变化是由于 γ 射线的电离效应造成的^[7], 采用适当的表面钝化技术或者预辐照技术可以有效地改善探测器暗电流的退化效应。比较图4a和图4b可以看到, 辐照偏压为0 V和-30 V的器件反向特性的辐照退化趋势没有明显的区别。

2) 高能电子辐照测试

电子辐照实验在西北核技术研究所进行, 辐照源为ELV-8型电子加速器, 本文采用的电子能量为1 MeV。本文的辐照实验在室温下进行, 剂量率为 $6.85 \times 10^{10} \text{ e/cm}^2\text{s}$, 最高剂量为 $3.43 \times 10^{14} \text{ e/cm}^2$ (实验单位认为该电子总剂量可以对应100 Mrad(Si)的累积总剂量)。

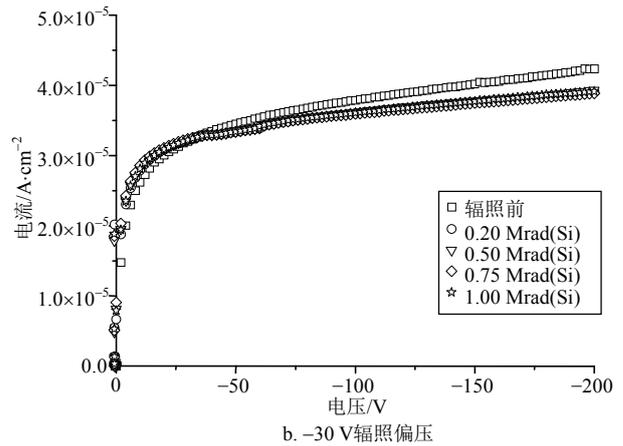
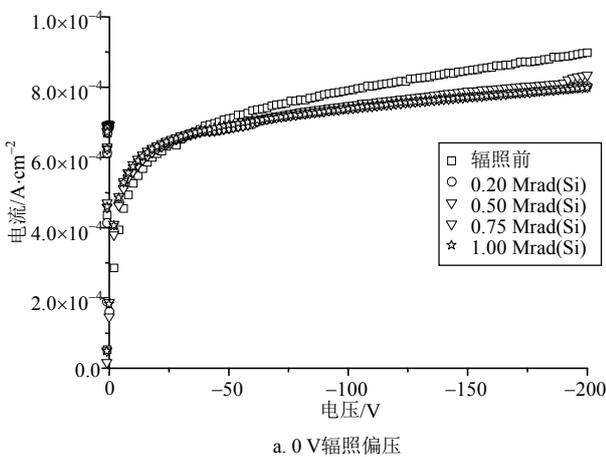


图4 不同 γ 射线剂量下的暗电流

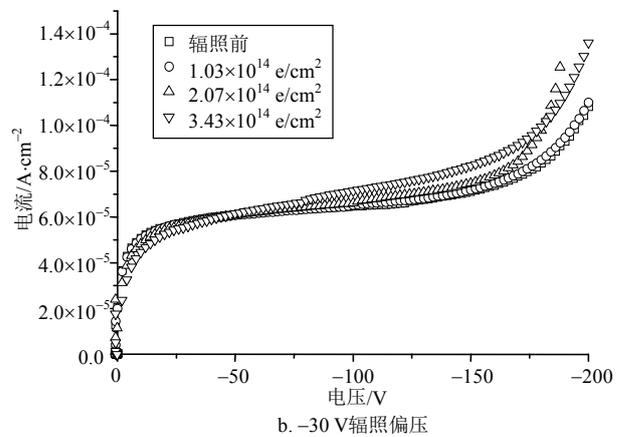
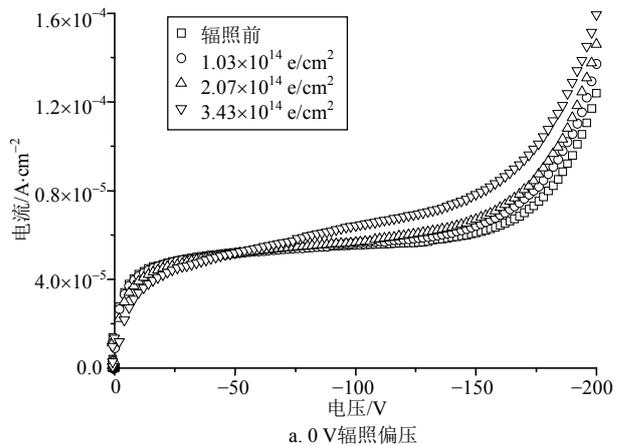


图5 不同电子剂量下的暗电流

不同电子剂量辐照后探测器的暗电流曲线如图5所示, 器件的反向电流随着辐照剂量的上升而轻微上升。-200 V下, 0 V偏压下的Ni/4H-SiC SBD的反向电流从 $1.24 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ 上升为 $1.59 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$; -30 V偏压下的SBD的反向电流从 $1.08 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ 上升为 $1.36 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ 。经过相当于100 Mrad(Si)的电子辐照后, 探测器的暗电流仅有适度的退化, 显示了良好的抗辐射特性。从图中可以看到, 0 V与-30 V辐照偏压下的器件的退化趋势没有明显区别。

高能电子辐照SiC材料时,造成C原子和Si原子位移所需的最低入射电子能量分别为100 keV和220 keV^[13]。因此1 MeV的电子辐照会在器件中同时引入电离损伤和位移损伤。反向电流的增加是由于电子辐照在材料中引入了复合中心^[6],增大了肖特基耗尽层中的复合电流。

本文的研究结果表明,对于 γ 射线和1 MeV电子辐照,辐照时加-30 V反偏压对Ni/4H-SiC SBD电离辐照探测器的暗电流的退化趋势和幅度都没有明显的影响。即在反偏压下工作时,Ni/4H-SiC SBD电离辐照探测器具有和零偏下一样的抗辐射能力,这一特性使其可以在强辐射环境中长期反偏压下工作,而不会影响其使用寿命。

3 结束语

本文采用同质外延的方法生长了高质量的SiC外延层,并研制了纵向结构的Ni/4H-SiC SBD电离辐照探测器。测试结果表明,该探测器具有暗电流小、灵敏度高、抗辐射能力强等优点。相比于SiC PN结或者Au/SiC SBD探测器而言,该探测器具有工艺简单成熟、成本较低等优势,是一种非常有潜力的电离辐照探测器。

参 考 文 献

- [1] BRUZZI M. Radiation damage in silicon detectors for high-energy physics experiments[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(4): 960-971.
- [2] DUBBS T, KROEGE W, NISSEN T, et al. Development of radiation hard materials for microstrip detectors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1999, 46(4): 839-843.
- [3] BRUZZI M, NAVA F, PINI S, et al. High quality SiC applications in radiation dosimetry[J]. Applied Surface Science, 2001, 184: 425-430.
- [4] NAVA F, VITTONI E, VANNI P, et al. Radiation tolerance of epitaxial silicon carbide detectors for electrons, protons and gamma-rays[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2003, 505(3): 645-655.
- [5] NIGAM S, KIM J, REN F. High energy proton irradiation effects on SiC schottky rectifiers[J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(13): 2385-2388.
- [6] ZHANG Lin, ZHANG Yi-men, ZHANG Yu-ming, et al. High energy electron radiation effect on Ni/4H-SiC SBD and Ohmic contact[J]. Chinese Physics B, 2009, 18(8): 3490-3494.
- [7] 张林, 张义门, 张玉明, 等. Ni/4H-SiC肖特基势垒二极管的 γ 射线辐照效应研究[J]. 物理学报, 2009, 58(4): 288-292.
ZHANG Lin, ZHANG Yi-men, ZHANG Yu-ming, et al. Gamma-ray radiation effect on Ni/4H-SiC SBD[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(4): 288-292.
- [8] 王悦湖, 张义门, 张玉明, 等. Ni/4H-SiC肖特基二极管高温特性研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(2): 63-66.
WANG Yue-hu, ZHANG Yi-men, ZHANG Yu-ming, et al. Characteristics of the Ni/4H₂SiC Schottky barrier diode at high temperatures[J]. Journal of Xidian University, 2004, 31(2): 63-66.
- [9] 张林, 张义门, 张玉明, 等. 4H-SiC肖特基二极管Gamma射线探测器的模型与分析[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(5): 854-858.
ZHANG Lin, ZHANG Yi-men, ZHANG Yu-ming, et al. Model and analysis of 4H-SiC Schottky diode as Gamma-ray detector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(5): 854-858.
- [10] SHERIDAN D C, CHUNG G, CLARK S, et al. The effects of high-dose gamma irradiation on high-voltage 4H-SiC schottky diodes and the SiC-SiO₂ interface[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(6): 2229-2232.
- [11] NILSSON B, RUDEN B I, SORCINI B. Characteristics of silicon diodes as patient dosimeters in external radiation therapy[J]. Radiotherapy and Oncol, 1988, 11: 279-288.
- [12] 王同权, 沈永平, 王尚武, 等. 空间辐射环境中的辐射效应[J]. 国防科技大学学报, 1999, 21(4): 36-39.
WANG Tong-quan, SHEN Yong-ping, WANG Shang-wu, et al. Radiation effects in the space radiation environment[J]. Journal of National University of Defense Technology, 1999, 21(4): 36-39.
- [13] STORASTA L, BERGMAN J P, JANZÉN E, et al. Deep levels created by low energy electron irradiation in 4H-SiC[J]. Journal of Applied Physics Volume, 2004, 96(9): 4909-4915.

编辑 张俊