

Ti/4H-SiC 肖特基势垒二极管抗辐射特性的研究*

张林[†] 肖剑 邱彦章 程鸿亮

(长安大学电子与控制工程学院, 长安大学道路交通检测与装备工程技术研究中心, 西安 710064)

(2010年7月21日收到; 2010年8月12日收到修改稿)

本文采用 γ 射线、高能电子和中子对 Ti/4H-SiC 肖特基势垒二极管(SBD)的抗辐射特性进行了研究. 研究发现对于 γ 射线和 1 MeV 电子辐照, -30 V 辐照偏压对器件的辐照效应没有明显的影响. 经过 1 Mrad(Si)的 γ 射线或者 1×10^{13} n/cm²的中子辐照后, Ti/4H-SiC 肖特基接触都没有明显退化; 经过 3.43×10^{14} e/cm²的 1 MeV 电子辐照后 Ti/4H-SiC 的势垒高度比辐照前轻微下降, 这是由于高能电子引入的电离损伤造成的, 且可以在常温下退火恢复. 分别经过 1 Mrad(Si)的 γ 射线和 3.43×10^{14} e/cm²的电子辐照后, 器件反向电流的变化都比较轻微, 显示了良好的抗辐射特性. 实验同时还发现电子和中子辐照会造成器件串联电阻增加.

关键词: 碳化硅, 肖特基, 辐照, 偏压

PACS: 61.82.Fk, 61.82.-d, 73.40.Sx

1. 引言

4H-SiC 肖特基势垒二极管(SBD)具有整流特性好、击穿电压高、高温特性好等优势, 是目前最成熟并已商用的 SiC 功率器件, 同时 SiC 肖特基接触也是其他多种 SiC 功率器件(如 MESFET)的重要部分^[1]. 由于 SiC SBD 主要应用在军事、空间等强辐射领域, 对其抗辐照特性进行研究具有重要的意义.

Ti 是目前工艺最成熟、研究最多的 SiC 肖特基接触金属之一, Ti/SiC 肖特基接触的辐照效应已有一些文献报道^[2-4], 但是目前的研究还存在很多空白. 以往的研究中一般只采用一种辐照粒子进行实验研究, 而实际的辐照环境中往往存在多种辐照粒子. 比较不同的辐照粒子对器件特性的影响, 具有重要的研究价值. 先前的研究在辐照时大都将 SiC SBD 零偏置, 而在应用中 SiC 肖特基接触经常工作在反偏压下. 目前已经有文献报道不同辐照偏压下的 SiC 器件的电离辐照损伤并不完全相同^[5-7], 但不同偏置状态下的 Ti/4H-SiC SBD 的辐照效应是否有区别, 目前还鲜见报道.

本文采用 γ 射线、高能电子和中子研究了 Ti/4H-SiC SBD 的辐照效应. 在 γ 射线和电子辐照时对器件分别加 0 V 与 -30 V 偏压, 以研究不同偏置状

态对 Ti/SiC SBD 的 γ 射线辐照效应的影响.

2. 器件制备与辐照实验

采用同质外延技术生长了 SiC SBD 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 5×10^{18} cm⁻³. 外延样品生长温度为 1570°C , 压强为 100 mbar (1 ba = 10^5 Pa), 外延层的厚度约 10 μm . 采用非故意掺杂工艺获得低掺杂的 n 型外延层.

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 N₂ 中经过 1000°C 高温退火 2 min 形成欧姆接触, 接着淀积 Cr/Au (50/200 nm). 然后在材料的外延面采用电子束蒸发 Ni/Cr/Au (200/50/200 nm), 剥离形成圆形肖特基图形. 器件的剖面结构如图 1 所示. 器件制备完成后, 用激光切片机将样品切开, 并采用陶瓷管壳进行封装, 用硅铝丝键合. 高频 CV 测试获得外延层的净载流子浓度约为 6.4×10^{14} cm⁻³.

辐照试验在西北核技术研究所进行. γ 射线辐照实验的辐照源为⁶⁰Co, 剂量率为 96.3 rad(Si)/s (1 Mrad(SiC) = 1.03 Mrad(Si))^[2] (1 rad = 10^{-2} Gy),

* 西安市科技计划项目(批准号: CXY1012)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: CHD2010JC054)资助的课题.

[†] E-mail: zhanglin_dk@chd.edu.cn

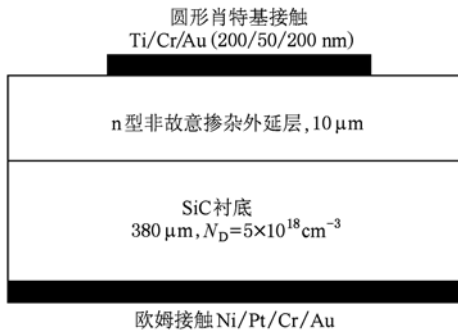


图1 Ti/4H-SiC SBD的剖面图

实验中最高累计总剂量为 1 Mrad(Si). 电子辐照实验的辐照源为 ELV-8 型电子加速器, 该加速器可以提供 0—2 MeV 的电子. 为了对应空间环境, 本文采用的电子能量为 1 MeV, 剂量率为 $6.85 \times 10^{10} \text{ e/cm}^2\text{s}$, 最高累计总剂量为 $3.43 \times 10^{14} \text{ e/cm}^2$ (实验单位认为该剂量可以对应 100 Mrad(Si)). 中子辐照实验的辐照源为西安脉冲反应堆, 该反应堆形成的辐照环境是中子和 γ 射线混合场, 中子的归一化能量为 1 MeV. 实验中采用的 n/ γ 比为 $3.3 \times 10^8 \text{ n/radcm}^2$, 中子注量率为 $8.1 \times 10^7 \text{ ncm}^{-2}\text{kW}^{-1}\text{s}^{-1}$. 在实验过程中, 反应堆先以 200 kW 的功率工作达到 $1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 的中子注量, 再以 1 MW 的功率工作达到 $1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 的中子注量. 最高中子注量对应的 γ 射线累计总剂量为 33 krad(Si).

以上的辐照试验均在室温下进行. γ 射线和电子辐照过程中, 采用直流电源 MPS-3005LP-3 对器件分别加 0 V 和 -30 V 偏压. 在不同的累积总剂量下采用 HP4156A 和 Agilent34980A 对器件进行离线测试, 测试过程中均没有发现器件有明显的升温. 中子辐照过程中, 所有器件均置 0 V 偏压. 由于中子辐照会造成材料活化, 所以采用在线测试以获得不同中子剂量下器件的电流特性.

3. 实验结果与分析

3.1. γ 射线

对 γ 射线辐照前后的器件测试发现, 辐照偏压为 0 V 和 -30 V 的器件的辐照退化趋势没有明显的区别, 与 Ni/4H-SiC 肖特基接触的报道结果类似^[8]. 图 2 为 Ti/4H-SiC SBD 辐照前后的典型电流特性(该器件的辐照偏压为 0 V). 经过 1Mrad(Si) 的 γ 射线辐照后, SiC SBD 的正反向特性都没有明

显退化.

本文的研究表明, 在 1 Mrad(Si) 的剂量内, 无论是辐照时 0 V 还是 -30 V 辐照偏压, Ti/4H-SiC SBD 都具有良好的抗 γ 射线辐射特性. 由于实验条件的限制, 本文的 γ 射线累积总剂量低于 SiC SBD 的辐照容限, 所以未能观察到 Ti/4H-SiC 肖特基接触的退化, 但是对参考空间辐照环境中的辐照剂量已经有一定的意义. 对于不同的地球轨道, 航天器内部的辐射剂量在 10^{-4} — $10^{-3} \text{ rad(Si)/s}$, 而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)^[9], 即本文实验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.

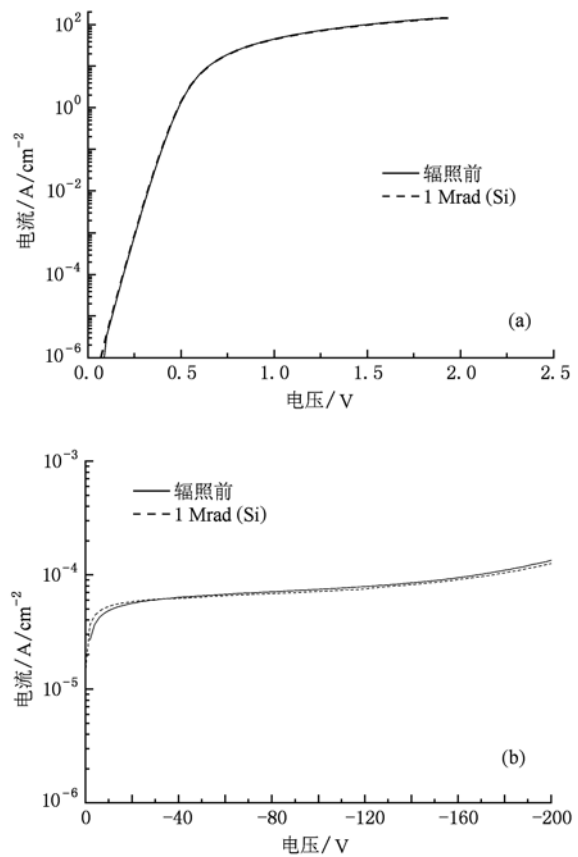


图2 γ 射线辐照前后 Ti/4H-SiC SBD 的正向特性(a)和反向特性(b)

3.2. 高能电子

对电子辐照前后的器件测试发现, 辐照偏压为 0 V 和 -30 V 的器件的辐照退化趋势没有明显的区别, 这之前报道的 Ni/4H-SiC SBD 的实验结果不同^[3]. 图 3 是不同辐照偏压的器件辐照前后的正向特性. 从图中可以看到, 经过 $3.43 \times 10^{14} \text{ e/cm}^2$ 的电

子辐照后,不同辐照偏压下的 Ti/4H-SiC SBD 的正向电流都在低电压下 (< 0.5 eV) 上升,在更高的电压下下降.

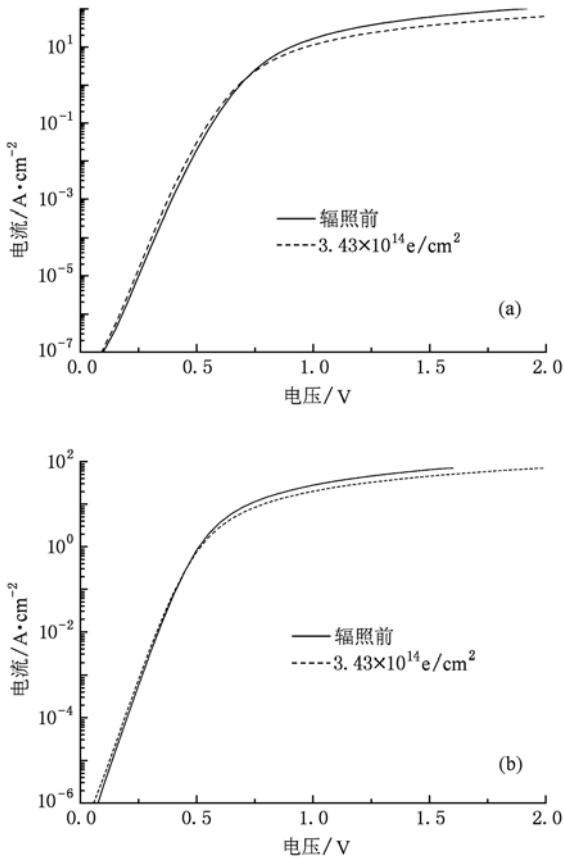


图3 电子辐照前后 Ti/4H-SiC SBD 的正向特性 (a) 0 V 辐照偏压; (b) -30 V 辐照偏压

器件工作在较小的正偏压时,可以采用热电子发射理论描述 SiC SBD 的电流特性^[10]:

$$I_F = I_S \left\{ \exp \left[\frac{q}{nkT} (V - I_F R_S) \right] - 1 \right\}, \quad (1)$$

I_S 是反向饱和电流,可以由半对数坐标下的 $I-V$ 曲线的线型区的线性拟合曲线与纵轴的截距得到, A^* 是 Richardson 常数 ($150 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$), n 是理想因子.

肖特基势垒高度 ϕ_B 可以由下式得到:

$$I_S = AA^* T^2 \exp \left(- \frac{q\phi_B}{kT} \right). \quad (2)$$

根据以上的肖特基参数提取理论,可以计算出辐照偏压为 0 V 和 -30 V 的 Ti/4H-SiC 肖特基接触的 ϕ_B 分别为 0.95 eV 和 0.86 eV,辐照后分别下降为 0.94 eV 与 0.84 eV.

当器件的外加正偏压较大后,可以提取串联电阻

$$R_s = \left(1 - \frac{\partial \ln I}{\partial V} \frac{nkT}{q} \right) / \left(\frac{\partial I}{\partial V} \right). \quad (3)$$

不同电子辐照剂量下的 Ti/4H-SiC SBD 的串联电阻的变化如图 4 所示,器件的串联电阻都随着辐照剂量的增加而增加.

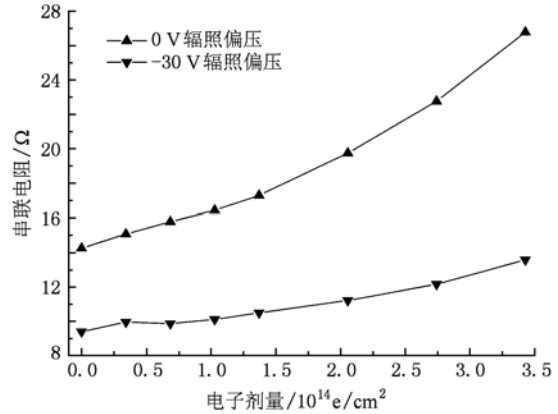


图4 不同电子剂量下 Ti/4H-SiC SBD 的串联电阻

图 5 是辐照前后 Ti/4H-SiC SBD 典型的反向特性(该器件的辐照偏压为 0 V).辐照前后器件的反向特性没有明显的退化,这是由于 SiC SBD 的反向电流的大小主要由势垒高度决定^[8],而辐照后势垒高度变化比较小,所以未造成反向电流的明显退化.

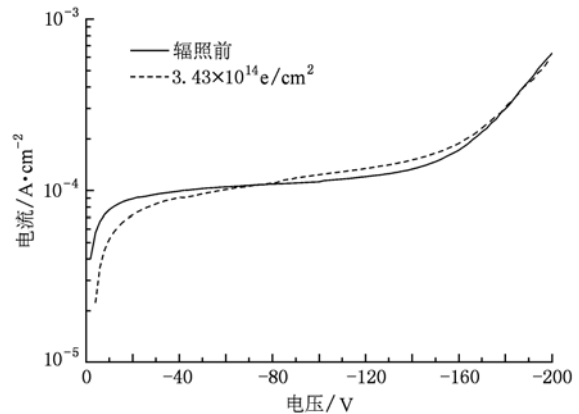


图5 电子辐照前后 Ti/4H-SiC SBD 反向特性

与 γ 射线只会引入电离损伤不同,高能电子会在半导体器件中同时引入电离损伤和位移损伤.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^[11],低于本文的辐照电子的能量.因此 SiC 串联电阻的增加可以解释为电子辐照在 SiC 材料中引入的辐照生缺陷在 SiC 材料中引入了载流子去除效应和迁移率去除效应^[12],造成了有源区电导率的

下降.

电子辐照后的样品在室温下放置了一段时间后再进行测试. 经过一个星期后, 所有辐照后器件的 ϕ_B 都完全恢复到了辐照前的数值. 退火的测试结果表明电子辐照造成 Ti/4H-SiC SBD 的 ϕ_B 变化是由于电子辐照引入的电离损伤造成的, 而且电离损伤可以在常温退火后修复.

3.3. 中子

图 6 是 Ti/4H-SiC SBD 经过不同中子注量辐照后的正向特性. 由于实验中 γ 射线的累积总剂量较低, 因此可以忽略 γ 射线对器件特性的影响. 经过 $1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 辐照后, 在较低的正向偏压下 ($< 0.6 \text{ eV}$), 器件的特性没有明显变化, 说明 Ti/4H-SiC 肖特基接触没有退化; 在较高的电压下器件的正向电流下降, 这是由于中子辐照造成有源区电导率下降导致的. 在更高的中子注量下, 器件的正向电流变得很小, 器件无法正向开启. 可能是由于有源区的载流子被辐照陷阱全部俘获, 器件的有源区变成了绝缘层造成的.

采用前文的参数提取方法, 可以获得辐照前 Ti/4H-SiC SBD 的 ϕ_B 为 0.82 eV ; 经过 $1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 中子辐照后没有明显的变化. 经过 $1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 辐照后, Ti/4H-SiC SBD 的串联电阻从 18.6Ω 上升为 21.5Ω . 当辐照剂量达到 $1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 时, 器件的串联电阻超过了 $5 \times 10^6 \Omega$. 可能是由于测试系统引入的噪声, 实验中没有获得器件反向电流的退化特性.

与高能电子不同, 中子辐照只会对器件造成位移损伤. 本文的研究结果表明, $1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 的中

子辐照的位移效应不会导致 Ti/4H-SiC 的 ϕ_B 变化, 显示了良好的抗中子辐照能力.

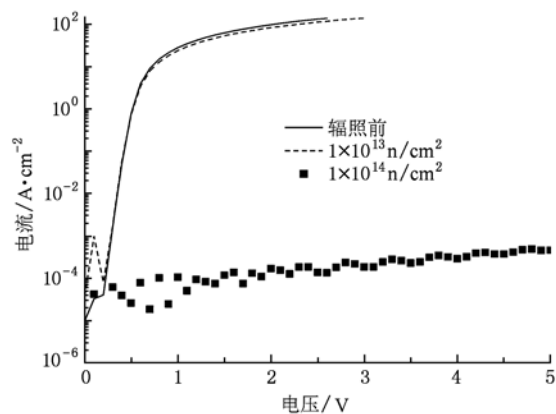


图 6 不同中子注量下 Ti/4H-SiC SBD 的正向特性

4. 结 论

本文采用 γ 射线、高能电子和中子研究了 Ti/4H-SiC SBD 的抗辐射特性. 经过 $1 \text{ Mrad}(\text{Si})$ 的 γ 射线辐照后, 器件的电流特性基本没有退化; 经过 $3.43 \times 10^{14} \text{ e/cm}^2$ 的电子辐照后器件势垒高度比辐照前轻微下降, 但器件的反向特性没有明显退化. 经过 $1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 的中子辐照后, 器件的串联电阻有所上升, 但肖特基接触没有明显退化. 对于 γ 射线和高能电子, 在辐照过程中对器件加 -30 V 偏压, 其辐照效应与 0 V 偏压辐照时没有明显区别. 本文的研究表明, 在不同的辐照偏压下, Ti/4H-SiC 肖特基接触对于多种类型的辐照粒子都有较高的辐照容限, 可以在强辐射环境中长期应用.

[1] Wang S G, Zhang Y M, Zhang Y M 2003 *Chin. Phys.* **12** 322
 [2] Sheridan D C, Chung G, Clark S, Cressler J D 2001 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **48** 2229
 [3] Zhang L, Zhang Y M, Zhang Y M, Han C, Ma Y J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1931
 [4] Kang S M, Ha J H, Park S H, Kim H S, Chun S D, Kim Y K 2007 *Nucl. Instrum. Methods A* **580** 416
 [5] Brisset C, Noblanc O, Picard C, Joffre F, Brylinski C 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 598
 [6] Zhang L, Zhang Y M, Zhang Y M, Han C, Ma Y J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3490
 [7] Shang Y C, Zhang Y M, Zhang Y M, Liu Z L 2003 *Journal of Electronics and Information Technology* **25** 389 (in Chinese) [尚

也淳、张玉明、张义门、罗晋生 2003 电子与信息学报 **25** 389]
 [8] Zhang L, Zhang Y M, Zhang Y M, Han C, Ma Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 288 (in Chinese) [张林、张义门、张玉明、韩超、马永吉 2009 物理学报 **58** 288]
 [9] Wang T Q, Shen Y P, Wang S W, Zhang S F 1999 *Journal of National University of Defense Technology* **21** 36 (in Chinese) [王同权、沈永平、王尚武、张树发 1999 国防科技大学学报 **21** 36]
 [10] Wang S G, Yang L A, Zhang Y M, Zhang Y M, Zhang Z Y, Yan J F 2003 *Chin. Phys.* **12** 0322
 [11] Storasta L, Bergman J P, Janzén E 2004 *Journal of Applied Physics* **96** 4909
 [12] Shang Y C, Zhang Y M, Zhang Y M 2000 *Nuclear Electronics &*

Radiation effect on Ti/4H-SiC SBD of gamma-ray, electrons and neutrons *

Zhang Lin[†] Xiao Jian Qiu Yang-Zhang Cheng Hong-Liang

(School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Road Traffic Detection and Equipment Engineering Research Center, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(Received 21 July 2010; revised manuscript received 12 August 2010)

Abstract

The Ti/4H-SiC Schottky barrier diodes (SBDs) were irradiated at room temperature with ^{60}Co gamma-ray source, 1 MeV electrons and neutrons, and 0V and -30 V bias voltage were applied to the diodes during gamma-ray and electron radiation. The measurement results show that -30 V radiation bias voltage has no influence on the radiation effect of the diodes. After 1 Mrad(Si) gamma-ray and 1×10^{13} n/cm² neutron radiation respectively, the Schottky barrier height of the diodes basically remain the same values. After an electron dose of 3.43×10^{14} e/cm², Schottky barrier height of the diodes slightly decreased, which was caused by ionizing damage of high energy electron, and recovered completely after annealing at room temperature. After gamma-ray and electron radiation, the reverse current of Ti/4H-SiC SBD had no obviously degradation. The on-state resistance of the diodes increased after electron and neutron radiation.

Keywords: silicon carbide, Schottky barrier diode, bias voltage, radiation effect

PACS: 61.82.Fk, 61.82.-d, 73.40.Sx

* Project supported by the Science and Technology Program of Xi'an (Grant No. CXY1012) and the Special Fund for Basic Scientific Research of Central Colleges, Chang'an University (Grant No. CHD2010JC054).

[†] E-mail: zhanglin_dk@chd.edu.cn