

Ni/4H-SiC 肖特基势垒二极管的 γ 射线辐照效应*

张 林[†] 张义门 张玉明 韩 超 马永吉

(西安电子科技大学微电子学院 教育部宽禁带半导体材料重点实验室 西安 710071)

(2008 年 8 月 1 日收到 2008 年 9 月 1 日收到修改稿)

对制备的 Ni/4H-SiC 肖特基势垒二极管(SBD)进行了 γ 射线辐照试验,并在辐照过程中对器件分别加 0 和 -30 V 偏压.经过 1 Mrad(Si)总剂量的 γ 射线辐照后,不同辐照偏压下的 Ni/4H-SiC 肖特基接触的势垒高度和理想因子没有退化, SiC 外延层中的少子寿命也没有退化.辐照后器件的反向电流下降,这是由于器件表面的负界面电荷增加引起的.研究表明,辐照偏压对 Ni/4H-SiC SBD 的辐照退化效应没有明显的影响.

关键词:碳化硅,肖特基,辐照效应,偏压

PACC: 7340S, 6170Y, 6180E, 8750G

1. 引 言

4H-SiC 材料具有禁带宽度大、热导率高、击穿电场高和辐射容限高等优良特性,成为制备高温、大功率、抗辐射器件的首选材料^[1].4H-SiC 肖特基势垒二极管(SBD)具有器件结构简单、工艺成熟、高温特性好等优势,是目前商用最广泛的 SiC 功率器件之一. SiC 肖特基接触也是其他 SiC 功率器件的重要部分^[2],如 MESFET(metal semiconductor field effect transistor), SST(static induction transistor)等.

半导体器件电离辐照效应的研究有着重要意义,因为抗辐射器件一般应用在核能、军事和空间等强电离辐射领域.由 ⁶⁰Co 辐射源放射的 γ 射线被广泛地应用于研究半导体器件的电离辐照损伤^[3]. γ 射线辐照产生的次级电子会在 SiC 材料中造成位移损伤,引入载流子陷阱和复合中心^[4].另外,还有文献报道^[5,6] γ 射线会使肖特基势垒高度 ϕ_b 和理想因子 n 发生变化.

Ni 是最常见的 SiC 肖特基接触金属之一, Ni/SiC 肖特基接触的 γ 射线辐照效应已有报道^[3-6].但是在以往的研究中,辐照时都将 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.不同

偏置状态下的 Ni/SiC SBD 的 γ 射线辐照效应是否有区别,目前还未见有文献报道.

本文进行了 Ni/4H-SiC SBD 的 γ 射线辐照实验,并对辐照退化的机理进行了分析.在辐照时对器件分别加 0 和 -30 V 偏压,以研究不同偏置状态对 Ni/SiC SBD 的 γ 射线辐照效应的影响.实验中 γ 射线的最高累计总剂量为 1 Mrad(Si).

2. 器件制备与辐照实验

本文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 公司生产的 VP508 型水平式低压热壁化学气相沉积系统.衬底为从德国 SiCrystal AG 公司购买的 Si 面,偏离(0001)面 8° 的 5 cm 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 10000 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 气氛中经过 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

* 国家自然科学基金(批准号:60606022)和西安应用材料创新基金(批准号:XA-AM-200702)资助的课题.

[†] E-mail: zhanglin@mail.xidian.edu.cn

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. 陶瓷管壳不能有效地屏蔽 γ 射线, 因而不会影响器件的辐照效应.

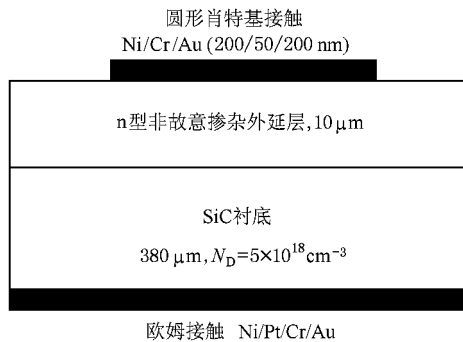


图 1 4H-SiC SBD 的剖面图

辐照试验在西北核技术研究所进行, 辐射源为 ^{60}Co , 剂量率为 $96.3 \text{ rad/s}(\text{Si})$ ($1 \text{ Mrad}(\text{SiC}) = 1.03 \text{ Mrad}(\text{Si})$)^[7]. 辐照试验在室温下进行. 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 HP 生产的 4156A 型半导体参数分析仪和 Agilent 公司生产的 34980A 型数据采集器对器件进行离线测试和

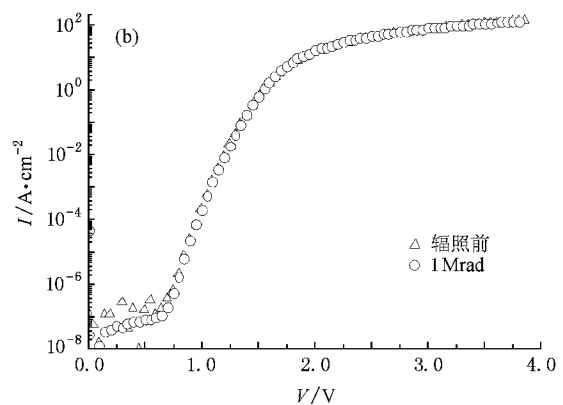
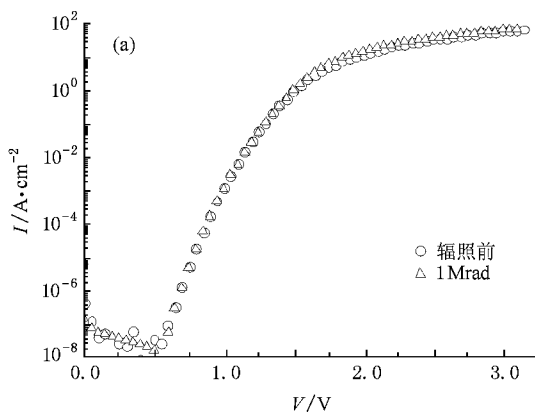


图 2 辐照前后的 Ni/4H-SiC SBD 的正向特性 (a) 不加偏压 (b) 加 -30 V 偏压

采用以上的理论, 可以提取辐照偏压为 0 和 -30 V 的器件辐照前的势垒高度分别为 1.26 和 1.20 eV, 理想因子分别为 1.25 和 1.22. 经过 1 Mrad (Si) 辐照后, 辐照偏压为 0 和 -30 V 的器件的势垒高度和理想因子都没有变化, 显示了 Ni/4H-SiC SBD 良好的抗 γ 辐照特性.

3.2. 反向特性

图 3 为不同辐照偏压下的器件在不同累积总剂

在线测试. 实验过程中没有发现器件有明显的升温. 实验中最高累计总剂量为 1 Mrad (Si).

3. 结果与讨论

3.1. 正向特性

图 2 为不同辐照偏压下器件辐照前后的正向电流特性. 经过 1 Mrad 的 γ 射线辐照后, 不同偏压下的 Ni/4H-SiC SBD 的正向特性都没有明显变化. 从图 2 可以看到, 在较低的正偏压下, $\ln J_F - V$ 成线性关系, 此时的 4H-SiC SBD 的电流特性可以由热电子发射理论来描述^[8], 即

$$J_F = J_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1 \right]. \quad (1)$$

这里 J_s 是反向饱和电流, 可以表示如下:

$$J_s = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{k_B T}\right), \quad (2)$$

其中 A^* 是 Richardson 常数, 取为 $150 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$. n 是理想因子, 可以由下式提取:

$$n = \frac{q}{k_B T} \frac{\partial V}{\partial \ln I}. \quad (3)$$

量辐照后的反向特性. 从图 3 可以看到, 辐照后器件的反向电流比辐照前有所下降. 经过 0.2 Mrad (Si) 辐照后, 辐照偏压为 0 V 的器件 -200 V 时的反向电流从 $8.98 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下降为 $8.03 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$; 辐照偏压为 -30 V 的器件在 -200 V 的反向电流从 $4.23 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下降为 $3.90 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$. 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. 比较图 3(a) 和 3(b) 可以看到, 辐照偏压为 0 和 -30 V 的器件反向特性的辐照退化趋势没有明显的

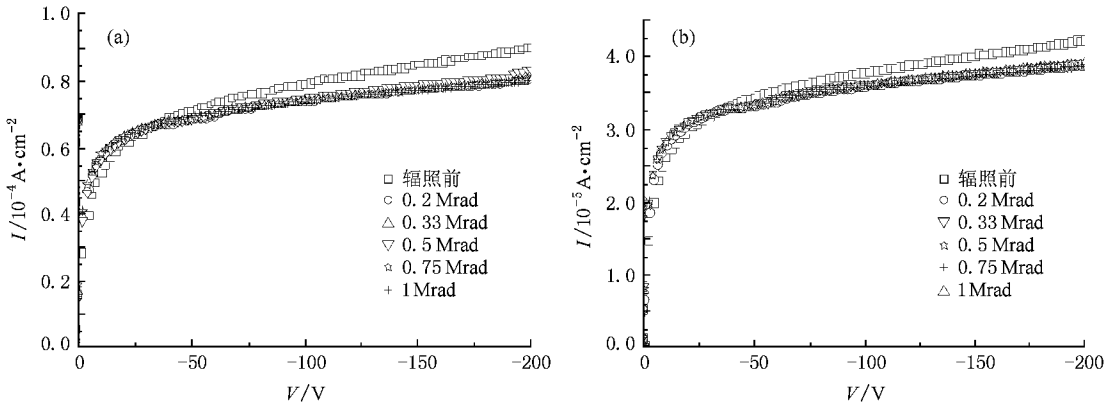


图3 不同累计总剂量的 Ni/4H-SiC SBD 的反向特性 (a) 0 V 偏压 (b) -30 V 偏压

区别.

SiC SBD 的反向电流主要由三个电流分量组成^[9,10],

$$\begin{aligned}
 J_r &= J_0 + J_t + J_w \\
 &= A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{k_B T}\right) + \frac{A^* T^2}{k_B T} \\
 &\times \int_0^{\phi_{\text{eff}}(V)} \exp\left(-\frac{8\pi}{3} \frac{\sqrt{2m_e^*}}{qhE_{\text{max}}} [\phi_{\text{eff}}(V) - u]^{3/2}\right. \\
 &\left. - \frac{u}{k_B T}\right) du + \frac{qn_i W}{2\tau_r}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

其中 J_0 为热电子发射电流, J_t 为隧穿电流, J_w 为空间耗尽区中的复合电流, m_e^* 为电子有效质量, q 为电子电量, h 为普朗克常数, E_{max} 为界面处最大电场强度, ϕ_{eff} 为考虑了势垒降低效应后的有效势垒高度, n_i 为本征载流子浓度, W 为耗尽区宽度, τ_r 为载流子寿命.

辐照对 4H-SiC SBD 反向电流特性的影响, 目前有三种理论解释. 一是辐照使肖特基势垒高度发生

了变化^[5,6], 二是辐照改变了复合电流的大小^[4], 三是辐照的电离效应造成器件表面的负界面电荷增加^[7,11,12].

J_0 与 J_t 主要与肖特基势垒高度有关, 结合前面的测试结果, 可以得知这两项电流分量辐照前后没有变化. J_w 主要与少子寿命有关, 通过对辐照生电流的测试可以观察辐照对少子寿命的影响. 辐照的电离效应造成的表面负电荷增加可以通过退火效应进行观察.

3.3. 辐照生电流

γ 射线辐照时, 在 SiC 材料中均匀地激发电子空穴对. 此时器件的反向电流主要由两部分构成. 一部分为器件的反向电流, 又称暗电流; 另一部分为辐照生电流. 后者可以等效为辐照在耗尽区和一个少子扩散长度以内的中性区中产生的空穴电流^[12]. 因此, 对辐照前后 SiC SBD 中辐照生电流的测试可以观察到 SiC 外延层中少子寿命的退化^[13].

图 4 是在线测试获得的暗电流和不同总剂量后

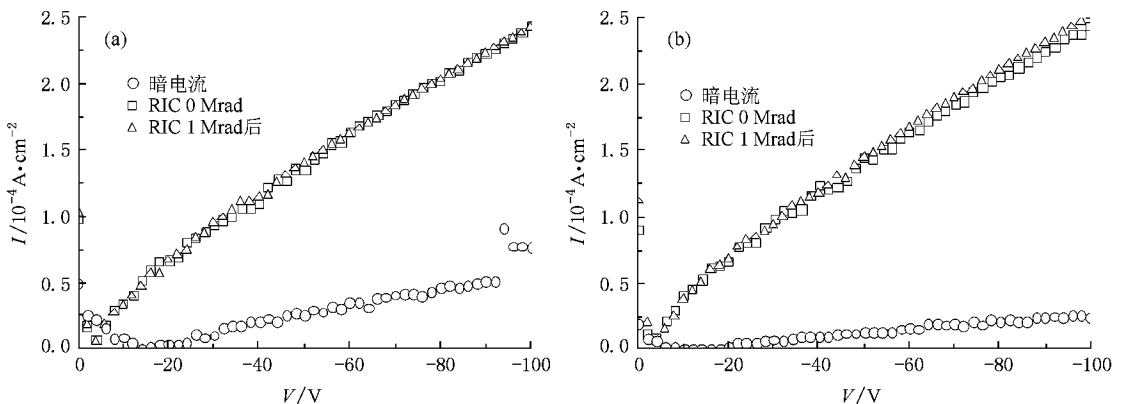


图4 不同累积总剂量辐照后 Ni/4H-SiC SBD 的辐照生电流 RIC 为辐照生电流 (a) 0 V 偏压 (b) -30 V 偏压

的辐照生电流.与图 3 比较可以看到,在线测试获得的暗电流比离线测试获得的反向电流大得多,这是由于在线测试时采用一根 40 余米长的扁平数据线连接样品与测试设备,引入了噪声.从图 4 可以看到,辐照偏压为 0 和 -30 V 的器件,辐照前后器件中产生的辐照生电流都没有明显的变化.结合上述测试结果,可以得知辐照后 SiC 外延层中的少子寿命没有明显的退化,即耗尽区中的复合电流没有变化.

3.4. 退火效应

电离辐照会在器件表面 SiC/SiO₂ 层引入辐照生界面态,相当于表面处的负电荷增加,会影响 SiC SBD 的反向特性,此效应在 γ 射线^[7]和高能质子辐

照^[10]中都被观察到.虽然本文的工艺中没有在器件表面制备 SiO₂ 层,但是在整个实验流程中 SiC 有可能氧化,在表面形成 SiO₂.

辐照停止后,部分辐照生界面态会在室温下复合消失,即产生退火效应^[9].将辐照后的样品在室内放置 10 天后再进行测试,辐照偏压 0 和 -30 V 的器件都出现了明显的退火效应,如图 5 所示.辐照偏压为 0 和 -30 V 的器件在 -200 V 时的反向电流分别变为 $8.78 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $4.18 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,但是没有回复到辐照前的特性,这是由于在室温下的退火只能使部分辐照生界面态修复,其余的需要更高的退火温度才能消除^[9].

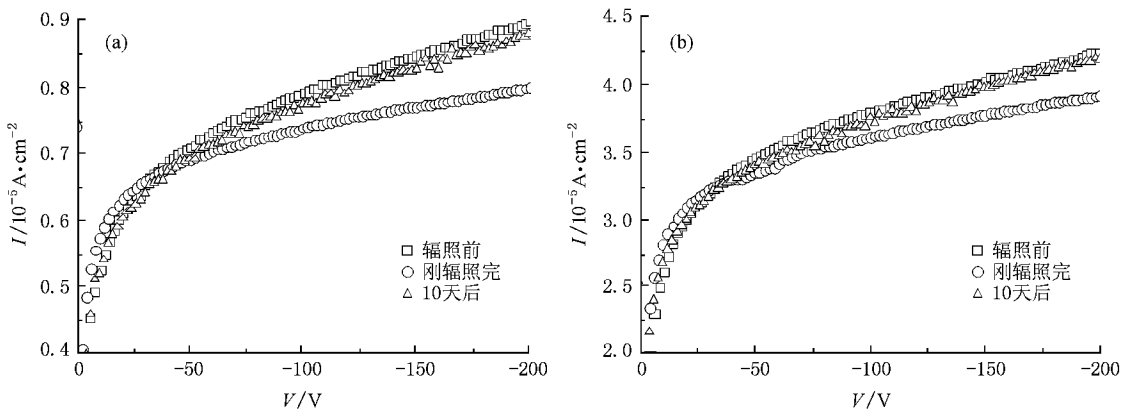


图 5 辐照后 Ni/4H-SiC SBD 的退火效应 (a) 0 V 偏压 (b) -30 V 偏压

4. 结 论

本文制备了 Ni/4H-SiC SBD 并进行了 γ 射线辐照实验,在辐照过程中对器件分别加 0 和 -30 V 偏压.经过 1 Mrad(Si) 的 γ 射线辐照后,不同辐照偏压下的 Ni/4H-SiC SBD 的势垒高度和理想因子都没有

退化, SiC 外延层中的少子寿命也没有退化.辐照后器件反向电流下降,通过对退火效应的测试,认为这主要是由于器件表面的负界面电荷增加造成的.研究发现,工作在反偏压下的 Ni/4H-SiC SBD 具有与零偏压下一样优良的抗 γ 辐射特性.本文的研究结果可以为应用于强电离辐射环境中的 Ni/4H-SiC SBD 的辐照退化提供参考.

[1] Zhang Y M 1998 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [张玉明 1998 博士学位论文(西安:西安电子科技大学)]
 [2] Wang S G, Zhang Y M, Zhang Y M 2003 *Chin. Phys.* **12** 322
 [3] Kim J, Nigam S, Ren F, Schoenfeld D, Chung G Y, Pearton S J 2003 *Electrochem. Solid-State Lett.* **6** G105
 [4] Shinobu O, Takeshi O, Toshio H, Kenta M, Shigeomi H, Naoya I, Kazuhisa K, Katsuyasu K 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 1953

[5] Kang S M, Ha J H, Park S H, Kim H S, Chun S D, Kim Y K 2007 *Nucl. Instrum. Meth. A* **580** 416
 [6] Jihyun K, Ren F, Chung G Y, MacMillan M, Baca A G, Briggs R D, Schoenfeld D, Pearton S J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 371
 [7] Sheridan D C, Chung G, Clark S, Cressler J D 2001 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **48** 2229
 [8] Zhang Y M, Zhang Y M, Luo J S 1999 *Chin. J. Semicond.* **20** 27 (in Chinese) [张玉明, 张义门, 罗晋生 1999 半导体学报 **20** 27]

- [9] Chang Y C , Zhang Y M 2001 *J. Xidian Univ.* **28** 467 (in Chinese)
[常远程、张义门、张玉明 2001 西安电子科技大学学报 **28** 467]
- [10] Zhang L , Zhang Y M , Zhang Y M , Zhang S X , Tang X Y , Wang Y H 2008 *High Power Laser Part . Beam* **20** 854 (in Chinese) [张林、张义门、张玉明、张书霞、汤晓燕、王悦湖 2008 强激光与粒子束 **20** 854]
- [11] Shang Y C , Zhang Y M , Zhang Y M , Liu Z L 2003 *J. Electron . Inf. Tech.* **25** 389 (in Chinese) [尚也淳、张义门、张玉明、刘忠立 2003 电子与信息学报 **25** 389]
- [12] Luo Z Y , Chen T B , Ayayi C , Sutton A K , Haugerud B M , Cressler J D , Sheridan D C , Williams J R , Marshall P W , Reed R A 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3748
- [13] Bruzzi M , Nava F , Pini S , Russo S 2001 *Appl. Surf. Sci.* **184** 425

Gamma-ray radiation effect on Ni/4H-SiC SBD^{*}

Zhang Lin[†] Zhang Yi-Men Zhang Yu-Ming Han Chao Ma Yong-Ji

(Key Laboratory for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices of Ministry of Education Microelectronic School , Xidian University , Xi'an 710071 , China)

(Received 1 August 2008 ; revised manuscript received 1 September 2008)

Abstract

Ni/4H-SiC Schottky barrier diodes (SBDs) were fabricated , and irradiated with the ⁶⁰Co gamma-ray source to the accumulated dose of 1 Mrad (Si). The 0 V and - 30 V bias voltage were applied to the SBDs during irradiation . After 1Mrad (Si) radiation , the Schottky barrier height and ideality factor of the Ni/4H-SiC SBDs under different bias voltages basically remain at the same values , and the minority carrier lifetime of the epitaxial layer also has no degradation . The reverse current decreases after radiation , which can be explained by the negative surface charge increase . The results show radiation bias voltage has no obvious influence on the radiation effect of the Ni/4H-SiC SBD .

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

PACC : 7340S , 6170Y , 6180E , 8750G

* Project support by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60606022) and Xi 'an Applied Material Innovation Foundation , China (Grant No. XA-AM-200702).

[†] E-mail : zhanglin@mail.xidian.edu.cn