

文章编号: 1001-4322(2010)01-0199-04

# SiC-pn 结二极管 $\alpha$ 粒子辐射效应\*

牟维兵<sup>1,2</sup>, 龚 敏<sup>1</sup>

(1. 四川大学 物理学院, 成都 610064; 2. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 为了研究 6H-SiC 材料制作的 pn 结二极管探测器的辐照特性, 采用蒙特卡罗程序模拟研究了 4.3 和 1.8 MeV 能量的  $\alpha$  粒子在辐照探测器中的物理过程。介绍了二极管探测器的工艺制作和物理参数, 根据其结构建立了仿真模型, 利用蒙特卡罗程序进行了  $\alpha$  粒子照射的仿真研究。研究结果直观地反映了  $\alpha$  粒子在探测器中的输运情况。 $\alpha$  粒子在探测器中的辐射效应主要是电离作用, 电离产生的电子-空穴对形成一定的分布。给出了  $\alpha$  粒子在探测器中的电离能量损失分布及二极管探测器的电荷收集效率表达式。

**关键词:** 6H-SiC; 二极管;  $\alpha$  粒子; 辐射效应

**中图分类号:** O485; O571133

**文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102201.0199

随着核科学技术的发展, 在恶劣环境下(如高温和强辐射环境)迫切需要使用新型的核辐射探测器。SiC 具有很多优良的物理特性, 如宽禁带、高电子饱和速度、高击穿电场和高热导率, 可以替代 Si 制作在恶劣环境下使用的辐射探测器。同时, 由于 Si 器件的抗辐射加固能力有限, 促使了在高质量、大尺寸的 SiC 体材料生长技术方面的研究。近年来, 国外开展了 SiC 肖特基和 pn 结二极管特性的研究<sup>[1-3]</sup>, 以及它们在恶劣环境下的使用性能研究<sup>[4-5]</sup>, 还探索了用 SiC 制作辐射探测器的可能性。国外有研究者利用 6H-SiC 外延层制作了 pn 结二极管, 采用  $\alpha$  粒子进行辐照实验研究, 以确定其探测器性能<sup>[5]</sup>。本文采用<sup>241</sup>Am 辐射源产生的  $\alpha$  粒子辐照探测器,  $\alpha$  粒子能量为 4.3 和 1.8 MeV, 利用 Morse2008 软件模拟  $\alpha$  粒子在探测器中的各种相互作用, 重点分析  $\alpha$  粒子电离效应产生的电子-空穴对, 从理论上探讨探测器的电荷收集效率。结果表明, 只要探测器的电荷收集效率为 100%, 完全可以作为极端恶劣环境下的核辐射探测器。

## 1 pn 结探测器的结构与制作

半导体材料采用美国 CREE 公司生产的 p 型 6H-SiC 平板材料, 材料厚度 300  $\mu\text{m}$ , p 型层的平均受主载流子数密度为  $4.2 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ 。在 p 型 6H-SiC 材料的外延层(厚度  $5.00 \mu\text{m} \pm 0.75 \mu\text{m}$ )上制作直径为 300  $\mu\text{m}$  的圆型探测区, 对探测区进行磷离子注入形成厚度 150 nm 的 n 型材料, 平均磷离子数密度为  $5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 。

图 1 是二极管探测器的结构图。在 800  $^{\circ}\text{C}$  温度下对 SiC 材料的外延层进行 3 次磷离子注入, 离子的能量分别是 140, 60 和 90 keV, 然后在氩气中 800  $^{\circ}\text{C}$  条件下退火 3 min, 形成了 n 型探测区。在 n 区上蒸 20 nm 厚度的铝形成电极, 另外在 p 型衬底蒸镀 80 nm 厚度的铝, 并在 850  $^{\circ}\text{C}$  的氩气环境中烧结 5 min 而形成电极。经 C-V 特性测量, 该二极管在 20 V 电压反向偏置的耗尽层厚度是 1.6  $\mu\text{m}$ , 在 200 V 电压反向偏置的耗尽层厚度

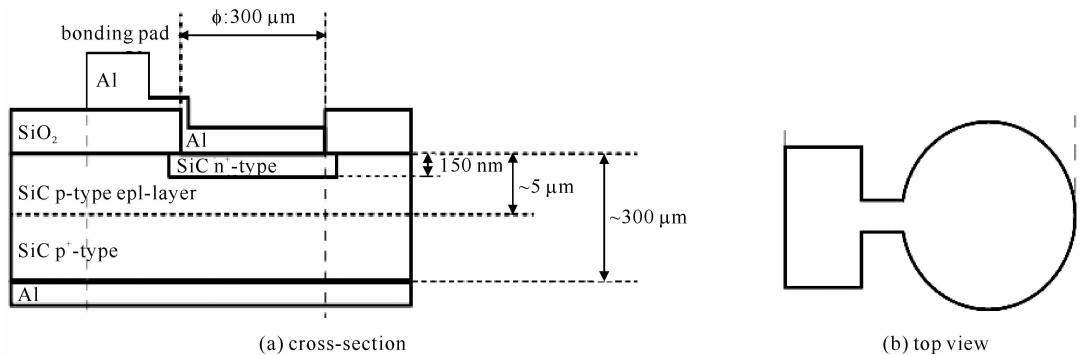


Fig. 1 Structure of pn-SiC diode

图 1 SiC 二极管探测器结构图

\* 收稿日期: 2009-04-03; 修订日期: 2009-08-28

作者简介: 牟维兵(1969—), 男, 副研究员, 从事电子学抗辐射加固研究; muweibing@sohu.com。

是  $4.4 \mu\text{m}$ 。

## 2 $\alpha$ 粒子辐照的仿真模型

根据探测器的结构建立仿真模型。 $\alpha$  粒子经过  $20 \text{ nm}$  厚度铝,  $150 \text{ nm}$  厚度 n 型 SiC 后进入  $300 \mu\text{m}$  厚度 p 型 SiC 中,  $\alpha$  粒子能量分别是  $1.8$  和  $4.3 \text{ MeV}$ , 垂直探测器表面入射。进行仿真时, 必须输入辐照材料的各种参数, 包括密度, 铝、硅和碳 3 种原子的晶格束缚能、表面束缚能和位移能如表 1 所示, 铝的密度取  $2.702 \text{ g/cm}^3$ ,  $6\text{H-SiC}$  的密度取  $2.287 \text{ g/cm}^3$ 。

表 1 二极管内原子的仿真参数  
Table 1 Simulation parameters of atoms in diode

atom	lattice binding energy/eV	surface binding energy/eV	displacement energy/eV
Al	3	3.36	25
Si	2	4.70	15
C	3	7.41	28

进行  $\alpha$  粒子辐照仿真时, 重点研究  $\alpha$  粒子在探测器中的径迹、辐射效应的种类、每种效应的能量损失及其分布情况, 为了保证仿真结果的可靠性, 每种能量  $\alpha$  粒子模拟  $10\,000$  个数量以上。

## 3 仿真分析

### 3.1 $\alpha$ 粒子在探测器中辐射效应的作用范围

$\alpha$  粒子在进入探测器的过程中, 不断与其中的电子发生库仑相互作用而损失能量, 同时以极小的几率与原子核发生作用。图 2 给出了 2 种能量各  $1\,000$  个仿真结果。

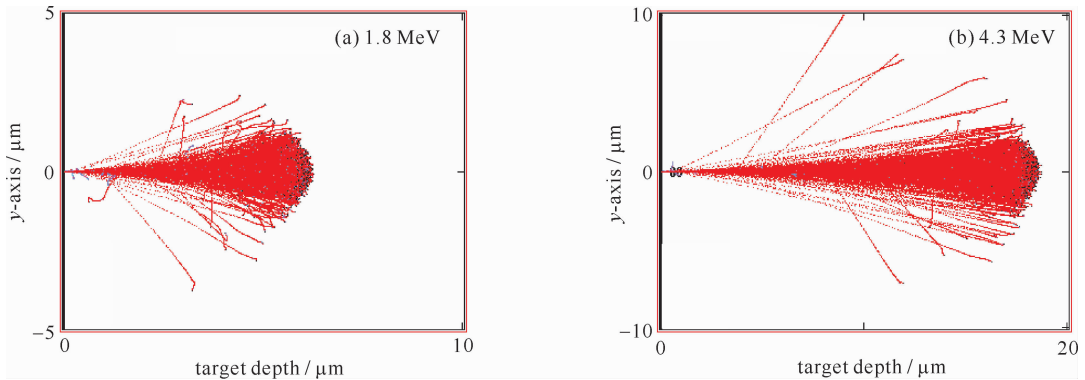


Fig. 2 Longitudinal distributions in diode of  $1.8 \text{ MeV}$  and  $4.3 \text{ MeV}$   $\alpha$  particles

图 2  $\alpha$  粒子在二极管中的纵向径迹分布

从图 2 中可以看出,  $\alpha$  粒子从同一位置辐照探测器后, 其径迹基本上在一个喇叭形结构内, 有极个别的  $\alpha$  粒子由于和探测器内部的原子核发生卢瑟福散射, 径迹发生很大的偏离。

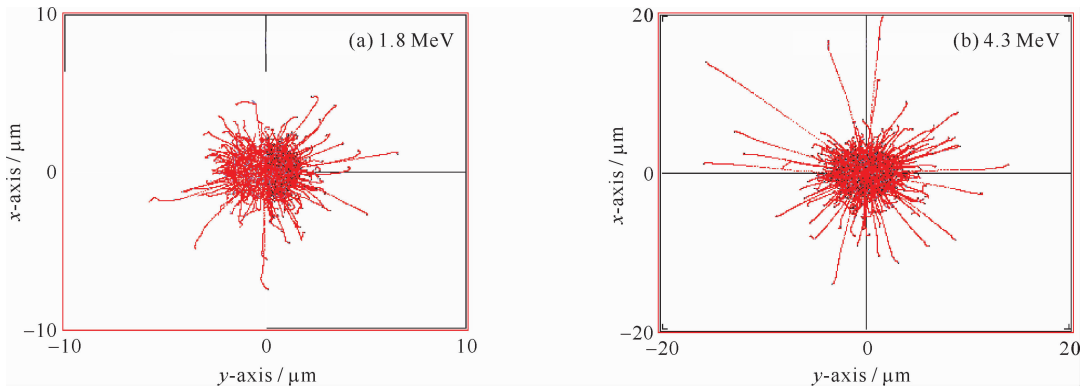
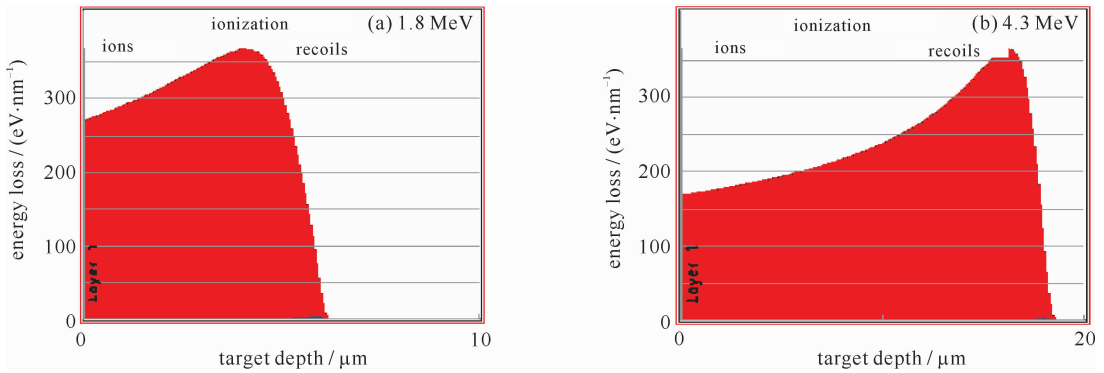
$1.8 \text{ MeV}$   $\alpha$  粒子在探测器中的平均穿透深度是  $5.89 \mu\text{m}$ , 晃动范围在  $0.1812 \mu\text{m}$ ;  $4.3 \text{ MeV}$   $\alpha$  粒子的平均穿透深度是  $18.0 \mu\text{m}$ , 晃动范围是  $0.2854 \mu\text{m}$ 。得到  $1.8 \text{ MeV}$   $\alpha$  粒子的最大作用深度是  $6.01 \mu\text{m}$ ,  $4.3 \text{ MeV}$  的  $\alpha$  粒子最大作用深度是  $18.29 \mu\text{m}$ 。对于探测器灵敏区厚度  $300 \mu\text{m}$  而言, 这 2 种  $\alpha$  粒子仅在探测器表面发生作用。

$\alpha$  粒子偏离入射轴越大, 从入射方向看, 其横向的径迹分布范围就越大。图 3 给出了与图 2 对应的横向径迹分布。

### 3.2 $\alpha$ 粒子对 SiC 二极管的辐照效应

$\alpha$  粒子通过电离、半导体原子产生卢瑟福散射形成位移缺陷以及能量传给晶格产生声子 3 种方式发生损失能量。

$\alpha$  粒子在探测器中的电离能量损失和  $\alpha$  粒子的能量有关, 一般而言, 能量越高, 其电离能量损失越小。由于铝的厚度为  $20 \text{ nm}$ , 仅占  $1.8 \text{ MeV}$  能量  $\alpha$  粒子穿透深度的  $0.3\%$  (对  $4.3 \text{ MeV}$  的  $\alpha$  粒子而言就更小), 且其电离能量损失要小于 SiC 中的损失, 因此可以不考虑  $\alpha$  粒子在铝中的电离能量损失。图 4 给出了电离能量损失的空间分布。

Fig. 3 Transverse distributions in diode of 1.8 MeV and 4.3 MeV  $\alpha$  particles图 3  $\alpha$  粒子在二极管中的横向径迹分布Fig. 4 Ionization energy loss distributions in diode of 1.8 MeV and 4.3 MeV  $\alpha$  particles图 4  $\alpha$  粒子在二极管中的电离能量损失分布

$\alpha$  粒子在整个作用过程中都会产生电离效应,也就是说,其电离效应发生在探测器灵敏区表层。如果 pn 结探测器反向偏置,只需 20 V 的外加电压,就可保证其内建电场大于  $7 \times 10^2$  V/m,只要在其中产生电子-空穴对,就会马上被电场加速而漂向两极,因此  $\alpha$  粒子在进入探测器后,在外加电场作用下会形成 1 个电流脉冲。与 Si 二极管探测器一样, SiC 可以做成理想的带电粒子探测器。

除了电离效应外,  $\alpha$  粒子还会与探测器灵敏区中的 C 和 Si 原子核发生卢瑟福散射,本质上是  $\alpha$  粒子接近原子核时,受核库仑场作用,原子核可能会偏离其平衡位置,从而引起晶格振动,以声子的形式损失能量。当原子核吸收能量更大时,会散射出去形成反冲核,反冲核也会产生电离作用。表 2 列出了它们所占的能量份额。这 2 种作用极少发生,所占比例很小,可以忽略不计。

表 2  $\alpha$  粒子在二极管中的能量损失比例Table 2 Energy loss ratio in diode of  $\alpha$  particles

$\alpha$ energy/MeV	ionization energy loss/%	phonons energy loss/%	vacancy energy loss/%
1.8	99.61	0.36	0.03
4.3	99.81	0.18	0.01

$\alpha$  粒子在 SiC 中产生 1 对电子-空穴所需能量为 8.4 eV, 1 个 1.8 MeV  $\alpha$  粒子在探测器中平均要产生  $2.13 \times 10^5$  电子-空穴对,而 1 个 4.3 MeV  $\alpha$  粒子在探测器中平均要产生  $5.11 \times 10^5$  电子-空穴对。按照电离能量损失分布,这些载流子数密度也存在一个相应分布,数密度随  $\alpha$  粒子的运动轨迹逐渐增加。

中子辐照 SiC 二极管时<sup>[6]</sup>,会在探测器中产生位移缺陷,这种缺陷可以俘获载流子,起到复合中心的作用。 $\alpha$  粒子辐照仿真结果表明,10 000 个  $\alpha$  粒子引起的位移缺陷平均只有 210 个左右,而产生的电子-空穴对达  $1 \times 10^8$  以上,对电离产生的电子-空穴的复合作用可以忽略。

#### 4 SiC 二极管探测器探测效率与 $\alpha$ 粒子的关系

SiC 二极管的电荷收集效率( $E_{cc}$ )与探测器 pn 结的耗尽区宽度  $W$ ,  $\alpha$  粒子的能量  $E_\alpha$ 、穿透深度  $d$  以及载流子(电子)扩散长度有关,可以用以下方程表示

$$E_{cc} = \frac{1}{E_a} \int_0^W \frac{dE}{dx} dx + \frac{1}{E_a} \int_w^d \frac{dE}{dx} \exp\left[-\frac{(x-W)}{L}\right] dx \quad (1)$$

式中:  $dE/dx$  是  $\alpha$  粒子的电离能量损失, 由图 4 中的数据给出。  $E_{cc}$  由 2 部分组成, 第 1 部分是  $\alpha$  粒子在耗尽区产生的电子-空穴对, 第 2 部分在中性区产生的扩散载流子。 电子的扩散长度  $L$  由以下方程确定

$$L = \sqrt{D\tau}, \quad D = (kT/q)\mu \quad (2)$$

式中:  $D$  和  $\tau$  表示电子扩散系数和寿命;  $\mu$  是电子迁移率;  $k, T$  是玻耳兹曼常数和热力学温度;  $q$  是电子电量。

室温下电子在 6H-SiC 材料中的迁移率是  $400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , 寿命是 24 ns, 根据式(2)计算电子的扩散长度是  $4.9 \mu\text{m}$ 。 通过二极管的 C-V 特性测量, 可以确定其耗尽区宽度的大小, 在反向偏置电压 200 V 以内, 1.8 和 4.3 MeV 的  $\alpha$  粒子的穿透深度都大于耗尽区宽度。 因此对 CCE 的估算都可以按照式(1)进行, 只要反向偏置电压大于 20 V, 可以确保对  $\alpha$  粒子产生电荷的收集效率为 100%。

## 5 结 论

$\alpha$  粒子对 6H-SiC 二极管的辐照效应包括电离、产生空位原子和声子, 相比电离效应, 其它影响可以忽略不计。 1.8 MeV 能量  $\alpha$  粒子在二极管探测器中通过电离损失的能占 99.61%, 4.3 MeV  $\alpha$  粒子则占 99.81%。  $\alpha$  粒子在整个穿过程中不断损失能量, 并且电离能量损失随着其能量降低还越来越大。 1.8 和 4.3 MeV 的  $\alpha$  粒子在探测器中的穿透深度分别为 6.01 和 18.29  $\mu\text{m}$ , 大于探测器反向偏置 200 V 时的 pn 结耗尽区宽度。 探测器的电荷收集效率与  $\alpha$  粒子穿透深度有关, 同时与偏置电压有关。

## 参考文献:

- [1] Ruddy F H, Dulloo A R, Seidel J G, et al. The fast neutron response of 4H silicon carbide semiconductor radiation detectors[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1998, **45**(1):536-540.
- [2] Rogalla M, Runge K, Söldner-Rembold A. Particle detectors based on semi-insulating silicon carbide[J]. *Nucl Phys B*, 1999, **78**(2):516-519.
- [3] Manfredotti C, Fizzotti F, Lo Giudice A, et al. Investigation of 4H-SiC Schottky diodes by ion beam induced charge technique[J]. *Appl Surf Sci*, 2001, **184**(1):448-452.
- [4] Brisset C, Noblanc O, Picard C, et al. 4H-SiC MESFETs behavior after high dose irradiation[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2000, **47**(1):598-603.
- [5] James R B, Schlesinger T E. Semiconductors for room temperature nuclear detector applications[M]. New York: Academic Press, 1995:43-49.
- [6] 尚也淳, 张义门, 张玉明. 中子辐照下的 6H-SiC pn 结电特性分析[J]. 半导体学报, 2000, **21**(7):691-696. (Shang Yechun, Zhang Yimen, Zhang Yuming. Analysis of electrical characteristics in 6H-SiC junctions irradiated by neutron. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2000, **21**(7):691-696)

## Irradiation effect of alpha particles on pn-SiC diode

Mu Weibing<sup>1,2</sup>, Gong Min<sup>1</sup>

(1. School of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Institute of Electronic Engineering, CAEP, P. O. Box 919-522, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The mechanism is studied by Monte Carlo method while 1.8 MeV and 4.3 MeV alpha particles irradiating the pn junction 6H-SiC diode. In the first the process and parameters of the diode detector are introduced, and then a simulation model is established according to the structure of the detector. The research results reflect the whole transport process of alpha particles in the detector directly. The main effect of alpha particles is ionization, which produces electron-hole pairs with certain distribution. The energy loss distribution of ionization and the charge collection efficiency equation of the diode detector are provided in the end.

**Key words:** 6H-SiC; diode; alpha particles; irradiation effects