

# SiC 基的高性能紫外光电探测器\*

黄莉敏 谢家纯 梁 锦

(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

摘要: 用宽禁带半导体 n-4H-SiC 和金属 Au 作肖特基接触, Ti, Ni, Ag 合金作背底形成欧姆接触, 研制出 Au/n-4H-SiC 肖特基紫外探测器. 测试分析了器件在高温高压下的光谱响应特性, 响应范围在 200~400nm 之间, 室温无偏压下, 响应峰值在 320nm, 响应半宽为 82nm. 在高反压下(100V 以上)探测器的光谱响应曲线出现了锐上升和锐截止, 在 260~380nm 之间有非常平稳的光谱响应; 在高温 533K 无偏压下, 紫外响应特性仍然保持良好.

关键词: 宽禁带; SiC; 肖特基; 光谱响应; UV 探测器

EEACC: 7230C

中图分类号: TN23

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)S0-0256-05

## 1 引言

第三代宽带隙(WBG)半导体材料 SiC 具有禁带宽(3.25eV<sup>[1]</sup>)、高反向击穿电场、高热导率、高载流子饱和漂移速率及抗辐照能力强等优点, 以 SiC 为基制作的 Au/n-4H-SiC 肖特基紫外探测器是一种高性能高效率的光电探测器<sup>[2,3]</sup>, 具有很好的应用前景<sup>[1,2,4]</sup>.

## 2 器件的制备

Au/n-4H-SiC 肖特基紫外探测器的结构如图 1 所示. 器件制备的半导体材料为 4H-SiC; 衬底为 n<sup>+</sup>型, 电阻率为 0.018Ω·cm, 厚度为 300μm; 外延层为 n 型; 掺杂浓度为  $2.3 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ , 厚度为 5.0μm, 微管缺陷 <32/cm<sup>2</sup>, 有源区结面积为 0.5~1mm<sup>2</sup>. 工艺流程: 清洗 SiC 后进行高温高纯氧气氧化, 干氧 30min+湿氧 5h+干氧 30min——去除背底的 SiO<sub>2</sub>(保护外延区的 SiO<sub>2</sub>)——背底电子束蒸发 Ti, Ni, Ag 50/500/300nm——950℃ 合金 5~8min(高纯氩气保护)——光刻有源区 SiO<sub>2</sub>(保护背底)——电子束蒸发有源焊接区厚 Ni 0.5μm——光刻压焊区, 电子束蒸发薄 Au 有源区 20~100nm, 光刻有源区和压焊区 Au——有源区 650℃ 肖特基合

金 5min(高纯氩气保护)——初测、划片、引线焊接、封装、测试分析. 为避免大的反射和吸收损失, 有源区 Au 必须很薄, 还可涂上抗反射涂层<sup>[5]</sup>.

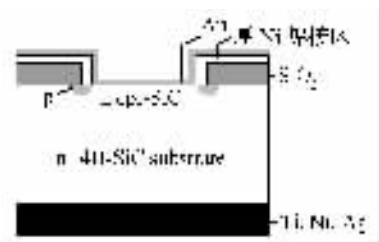


图 1 器件结构

Fig. 1 Structure of the device

## 3 基本原理

半导体受光照时, 材料吸收光子能量, 激发产生光生载流子, 光能转换成电能, 利用光电转换效应实现对光的探测. Au/n-4H-SiC 肖特基紫外探测器利用金属与宽禁带半导体 SiC 形成的肖特基接触<sup>[6]</sup>制作金半光电二极管探测光电信号<sup>[5]</sup>. 肖特基势垒产生光伏效应, 入射光激发产生电子-空穴对在内建电场作用下向相反方向漂移. 当入射光子能量 ≥ 半导体的禁带宽度时, 光辐照能穿过金属层在半导体中激发产生电子-空穴对. SiC 的禁带宽  $E_g = 3.25\text{eV}$ , 由公式  $h\nu \geq E_g, \lambda\nu = c$ , 得  $\lambda \leq 382.2\text{nm}$ . 因此以 SiC 为基的探测器对红外辐射不响应, 而对紫外信号有

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: NSFC-50132040)

响应. 下面是对几个样品器件一些特性的测试与分析.

## 4 样品测试与分析

### 4.1 $I$ - $V$ 特性

如图 2 所示, Au/4H-SiC 肖特基二极管的正向  $I$ - $V$  特性符合热电子发射理论<sup>[6~8]</sup>. 如图 3 所示, 采用 Keithley Model 2000 Multimeter 测得反向 10V 室温时的漏电流为  $10^{-11}$  A. 室温时器件的反向击穿电压 200V, 50℃时为 180V, 260℃时为 80V, 器件反向击穿电压高. 一般器件的工作偏压  $< 20$  V, 所以 260℃下器件仍能很好地工作. 根据材料掺杂浓度  $N_D = 2.3 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ , 由 SiC 的击穿电压与掺杂浓度的关系得到其击穿电压为 220~250V<sup>[2]</sup>, 与实验比较符合.

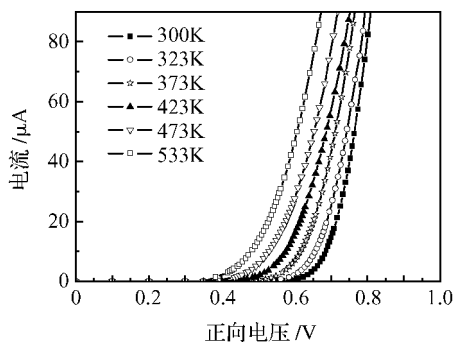


图 2 不同温度下正向  $I$ - $V$  曲线

Fig. 2 Forward  $I$ - $V$  characteristics at different temperatures

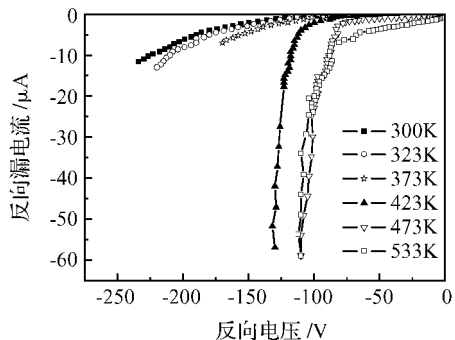


图 3 不同温度下反向  $I$ - $V$  特性

Fig. 3 Reverse  $I$ - $V$  characteristics at different temperatures

### 4.2 $C$ - $V$ 特性

在小信号应用中, 未封装的肖特基势垒二极管可以用图 4 所示的等效电路表示. 图中  $C_j$  为二极管的结电容,  $r_d$  为二极管的结电阻,  $r_s$  为串联电阻.

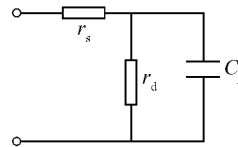


图 4 肖特基二极管等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of Schottky diode

$$C_j = A \sqrt{q\epsilon_s N_D / 2(V_{bi} - V)} \quad (1)$$

式中  $A$  表示结面积;  $N_D$  为衬底浓度;  $V$  对于正向偏压取正值. 由(1)式可以算出内建电势  $V_{bi}$ :

$$V = V_{bi} - A^2 q\epsilon_s N_D / 2C_j^2 \quad (2)$$

由(2)式可知  $1/C_j^2$  与外加电压  $V$  之间存在线性关系,  $1/C_j^2 = 0$  时的截距和内建电势  $V_{bi}$  对应. 图 5 是采用 HP4275 LCR METER 测试本实验制作的 Au/4H-SiC 肖特基二极管在频率为 10kHz 时电容与电压关系曲线, 可得到  $V_{bi} = 1.3$  V.

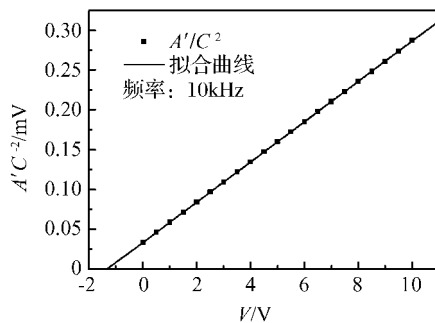


图 5 器件  $C$ - $V$  特性

Fig. 5  $C$ - $V$  characteristic of the device

### 4.3 光谱响应特性

采用 Hitachi M850 荧光分光光度计产生入射光测量光谱响应特性, 其波长范围为 200~930nm, 准确度为  $\pm 0.2$  nm. 在室温无偏压下, 测得探测器光谱响应范围为 200~400nm, 响应峰值在 320nm, 响应半宽为 82nm, 如图 6 所示. 由前述可知, SiC 光探测器的长波限为 382.2nm. 如图 6 所示, 器件对波长大于 382nm 的入射光响应已经很小, 相对峰值响应接近零, 与计算结果一致, 实验与理论符合得较好. 小于 200nm 的入射光波长短, 光吸收系数大, 表面

复合速度也大,光生载流子在穿过耗尽区之前就被吸收复合掉,无法在外电路中形成光电流。

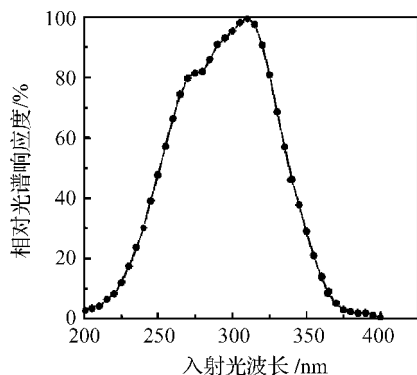


图 6 光谱响应曲线

Fig. 6 Spectrum response curve

#### 4.4 光谱响应特性随偏压的变化

Au/n-4H-SiC 肖特基紫外探测器的光谱响应曲线是在反偏压或无偏压下测试的<sup>[7]</sup>,先将探测器分别置于 0, 6, 12V 测试,结果如图 7 所示.加反向偏压后探测器灵敏度增加,响应幅度也增大.反偏压 12V 下光谱响应峰值为 314nm,比无偏压下向短波方向移了 6nm.因为反向偏压下耗尽区电场增大,

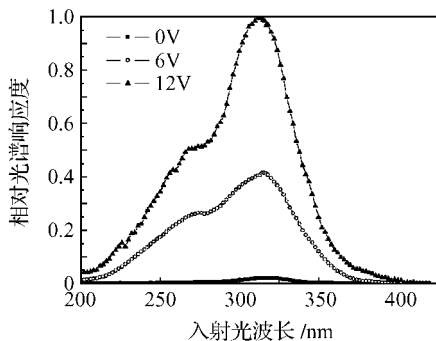


图 7 不同偏压下光谱响应曲线

Fig. 7 Spectrum response curves at different reverse biased voltages

载流子穿过耗尽区的时间缩短,所以原来无偏压或小反压下短波长的入射光产生的被复合掉的光生载流子,在足够大的反偏压下可在复合前就穿过耗尽区,在外电路形成光电流,响应峰值往短波方向移动.继续测量探测器在 20, 40, 60V 时的光谱响应,结果如图 8 所示,灵敏度及光电流继续增加,但响应峰值已不再往短波方向移动,因为载流子的响应速度是有限的(受载流子的扩散、耗尽层电容等因素限

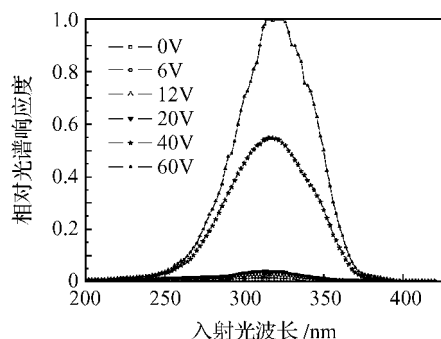


图 8 不同偏压下光谱响应曲线

Fig. 8 Spectrum response curves at different reverse biased voltages

制)<sup>[2]</sup>,所以响应峰值的移动也是有限的.电压加至 100, 150V 时,探测器的灵敏度迅速增加(图 9),出现了锐上升和锐截止,这是由于高压下,本征区耗尽并使载流子以散射的极限速度漂移,所以电子很

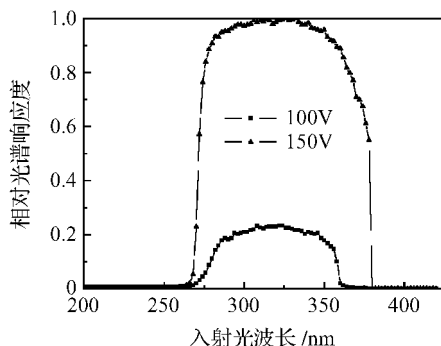


图 9 高压下光谱响应曲线

Fig. 9 Spectrum response curves at high reverse biased voltages

快全部越过了金半接触势垒.在很宽的波段内(260~380nm)探测器有非常平稳的响应是因为这时探测器已工作在饱和区,电子已基本上越过势垒.高场下,电场主要集中在半导体一侧,耗尽层宽度增大,接近雪崩击穿电压时,激发出的光电子产生雪崩倍增效应.计算电压等于 150V 时的耗尽层宽度:

$$x_c = \sqrt{2\epsilon_r\epsilon_0 V_{BR}/qN_D} \quad (3)$$

其中 SiC 的相对介电常数  $\epsilon_r = 10.2 \pm 0.2$ ,  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$ , 掺杂浓度  $N_D = 2.3 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ , 得到  $x_c = 2.7 \mu\text{m}$ , 小于外延层厚度  $5 \mu\text{m}$ . 根据 SiC 的临界击穿电场  $100 \text{ V}/\mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>, 得到器件的击穿电压为 270V, 与前述由掺杂浓度得到的反向击穿电压 220~250V 比较吻合.

#### 4.5 光谱响应特性随温度的变化

图 10 是无偏压不同温度下的光谱响应曲线. 当温度升高时, 光谱响应曲线发生蓝移. 因为高温下半导体禁带变窄, 对长波光子的吸收增多, 器件的光谱响应特性向长波方向移动<sup>[9]</sup>. 由图 2, 3 知 260℃ 下器件的  $I-V$  特性良好, 反向漏电流很低, 说明器件的工作温度在 260℃ 以上.

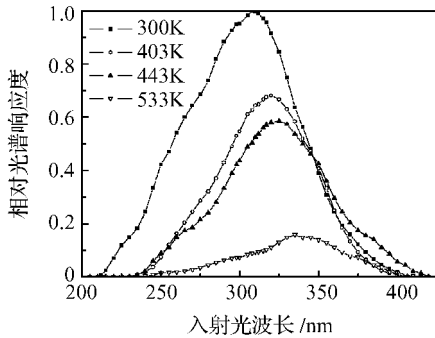


图 10 不同温度下光谱响应曲线

Fig. 10 Spectrum response curves at different temperatures

#### 4.6 量子效率

探测器的量子效率  $\eta = \frac{I_p/e}{P_i/h\nu}$ , 其中  $I_p$  是光电流,  $P_i$  是入射光功率. 用 LP-3A 型激光功率测试仪

测出 M850 荧光分光光度计产生的紫外入射光功率是  $6.5 \mu\text{W}$ , 且不随波长变化, 考虑到功率计和探测器的有效感光面积不同, 计算时对功率值作了必要的修正. 计算无偏压下 300, 403, 443 和 533K 下的量子效率最大值分别为 29.34%, 19.24%, 16.27% 和 4.25%.

### 5 结论

本文报道了采用宽禁带半导体材料 n-4H-SiC 和金属 Au 研制出的 Au/n-4H-SiC 肖特基紫外探

测器在高温、高压等极限条件下仍然保持良好的  $I-V$  特性及光谱响应特性. 器件光谱响应范围 200~400nm, 室温无偏压下, 响应峰值在 320nm, 响应半宽 82nm, 反偏压下光谱响应灵敏度提高, 特别在高反压下(100V 以上)探测器的光谱响应曲线出现了锐上升和锐截止, 在 260~380nm 之间有非常平稳的光谱响应. 无偏压下随温度的升高, 光谱响应曲线发生蓝移, 工作温度高于 260℃ 时, 紫外响应特性仍然保持良好. 所以该器件可以在高温下工作, 由于其暗电流很低, 甚至在温升时也可检测到低亮度的紫外线.

#### 参考文献

- [1] Cooper J A Jr. Special issue on silicon carbide electronic devices. New York: IEEE, 1999: 442
- [2] Hao Yao, Peng Jun, Yang Yintang. Technology of semiconductor of SiC wide-gap. Beijing: Science Press, 2000: 190, 12 (in Chinese)[郝跃, 彭军, 杨银堂. 碳化硅宽带隙半导体技术. 北京: 科学出版社, 2000: 190, 12]
- [3] Brown D M, Downey E T, Ghezzi M, et al. Silicon carbide UV photodiodes. IEEE Trans Electron Devices, 1993, 40(2): 325
- [4] Chow P P, Klaassen J J, VanHove J M, et al. Group III-nitride materials for ultraviolet detection applications. SPIE Optoelectronics, 2000, 3948: 295
- [5] Sze S M. Semiconductor devices: Physics and technology. Beijing: Science Press, 1992: 308 (in Chinese)[施敏. 半导体器件: 物理与工艺. 北京: 科学出版社, 1992: 308]
- [6] Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng, et al. Semiconductor physics. Beijing: National Defense Industry Press, 1997: 178 (in Chinese)[刘恩科, 朱秉生, 罗晋生, 等. 半导体物理学. 第 4 版. 北京: 国防工业出版社, 1997: 178]
- [7] Grekhov I V, Ivanov P A, Samsonova T P, et al. SiC-based phototransistor with a tunnel MOS emitter. IEEE Trans Electron devices, 1999, 46(3): 577
- [8] Liang S, Sheng H, Liu Y, et al. ZnO Schottky ultraviolet photodetectors. J Cryst Growth, 2001, 225: 110
- [9] Blank T V, Goldberg Y A, Konstantinov O V. Temperature dependence of the performance of ultraviolet detectors. Nucl Instr Meth A, 2003, 509: 109

# High Quality Ultraviolet Photodetectors Based on Silicon Carbide\*

Huang Limin, Xie Jiachun, and Liang Jin

*(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)*

**Abstract:** Au/n-4H-SiC Schottky ultraviolet photodetectors are fabricated using wide band semiconductor n-4H-SiC and metal Au as Schottky contact and ohmic contact of Ti, Ni, Ag alloys on the back side. The spectrum response characteristics at high temperature and high reverse biased voltage of the devices are measured and analyzed. The response wavelength range is between 200 and 400nm. At room temperature without biased voltage, the response peak is found at 320nm and the half width of response wavelength is 82nm. The spectrum response and cut-off velocity of the detectors increase sharply at high reverse biased voltage (above one hundred voltage). And the spectrum response curves are very plain between 260 and 380nm. At 533K without biased voltage, UV response characteristics of the device remain very well.

**Key words:** wide band gap; SiC; Schottky; spectrum response; UV detection

**EEACC:** 7230C

**Article ID:** 0253-4177(2005)S0-0256-05

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. NSFC-50132040)

Received 26 October 2004, revised manuscript received 30 November 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics