

# 碳化硅紫外探测器的研究\*

王丽玉, 谢家纯, 胡林辉, 王克彦

(中国科学技术大学物理系, 安徽合肥 230026)

**摘要:**采用宽禁带半导体 n-4H-SiC 和金属 Au 作肖特基接触, TiNiAg 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. 测试分析了该器件的光谱响应特性: 响应范围为 200~400 nm 之间; 在室温无偏压下, 响应峰值在 310 nm 处, 响应半宽为 85 nm. 同时测试分析了该器件的 *I-V* 特性: 在室温下, 正向开启电压为 0.8 V, 反向击穿电压大于 200 V, 反向漏电流小于  $10^{-10}$  A; 工作温度大于 250 °C. 实验表明, Au/n-4H-SiC 肖特基紫外探测器具有很好的紫外响应特性和很低的反向漏电流.

**关键词:**宽禁带; SiC; 肖特基; 光谱响应; UV 探测

**中图分类号:** TN3

**文献标识码:** A

## 0 引言

第三代宽禁带半导体 SiC 具有宽禁带、高临界击穿电场、高热导率、高载流子饱和漂移速度等优点, 特别适合制作光电子、抗辐射、高频、大功率、高温、高压等方面的半导体器件<sup>[1-3]</sup>. 由于现代科学技术的高速发展, 传统的 Si 器件已很难满足要求, 所以研制高性能的 SiC 器件已成为国际上新的研究热点之一<sup>[1]</sup>.

SiC 的禁带宽(3.25 eV)<sup>[4]</sup>, 故 Au/n-4H-SiC 肖特基紫外探测器对红外线辐射不响应, 可用于探测红热背景下的紫外信号. 同时该器件的反向漏电流(即暗电流)很低, 可用来检测高温环境中的微弱紫外信号<sup>[1,5]</sup>. 器件高温、高压特性也很好, 工作温度高于 250 °C, 室温下反向击穿电压大于 200 V. 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, 具有很好的应用前景.

## 1 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: 4H-SiC; 衬底:  $n^+$  型, 电阻率  $0.014 \Omega \cdot \text{cm}$ , 厚度 300  $\mu\text{m}$ ; 外延层:  $n$  型, 掺杂浓度  $3.3 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ , 厚度 10.0  $\mu\text{m}$ , 微管缺陷  $< 10/\text{cm}^3$ . 工艺流程如下: 将清洗过的 SiC 在高温高纯度的氧气中进行氧化, 干氧 30 min + 湿氧 5 h + 干氧 30 min, 接着去除背底的  $\text{SiO}_2$  (保护外延区的  $\text{SiO}_2$ ),

\* 收稿日期: 2003-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50132040); 中科院创新项目(KJCX2-SW-04)

作者简介: 王丽玉, 女, 1978 年生, 硕士生. E-mail: wly@ustc.edu

再进行背底电子束蒸发 TiNiAg 50/500/300 nm 后,进行 950 °C 合金 5 ~ 8 min(高纯氩气保

护),再光刻有源区 SiO<sub>2</sub>(保护背底),然后电子束蒸发有源焊接区厚 Au 500 μm,接着光刻压焊区,电子束蒸发薄 Au 有源区 50 ~ 150 nm,光刻有源区和压焊区 Au,再进行有源区 650 °C 肖特基合金 5 min(高纯氩气保护),然后进行初测、划片、引线焊接、封装,最后综合测试分析.器件的有效面积直径是 400 μm.

图 1 Au/n-4H-SiC 探测器结构

Fig.1 Structure of the Au/n-4H-SiC detector

为了避免大的反射和吸收损失,有源区 Au 必须很薄,也可涂上防止反射的透明膜<sup>[6]</sup>.

## 2 测试与分析

Au/n-4H-SiC 肖特基紫外探测器工作的基本原理就是金属-半导体接触的肖特基效应和金属-半导体光电二极管的原理,具体的分析内容见文献[6,7].

金属 Au 的功函数  $W_m > W_s$  半导体 SiC 的功函数,当 Au 与 SiC 接触时 SiC 中的电子流向 Au,使 Au 带负电、SiC 带正电,Au 与 SiC 间存在电势差,称为肖特基势垒  $\Phi_{ns}$ .

$$q\Phi_{ns} = W_m - \chi \quad (1)$$

其中  $\chi$  是 SiC 的电子亲和能,该公式没考虑半导体表面态对肖特基势垒的影响.

当入射光子能量  $h\nu \geq E_g$  半导体 SiC 的禁带宽度时,半导体吸收光产生的空穴-电子对被势垒区的电场分开,形成载流子.当载流子漂移通过势垒区时,在外电路产生电流.下面是对该器件一些特性的测试与分析.

### 2.1 正向 I-V 特性

Au 的功函数  $W_m = 4.8 \text{ eV}^{[7]}$ ,SiC 电子亲和能  $\chi = 4.0 \text{ eV}^{[7]}$ ,则由公式(1)计算器件的肖特基势垒  $\Phi_{ns}$  是 0.8 V.图 2 用 JT-1 型晶体管特性测试仪在室温(300 K)下测量的结果显示,器件在室温下的正向开启电压 0.8 V,与计算结果一致,因为 n 型外延层掺杂浓度很小,且 SiC 禁带宽,不易存在表面态,所以表面态对势垒的影响很小,可忽略.

由图 2 知,在 523 K 下探测器的 I-V 曲线仍然呈指数形式上升,符合肖特基的热电子发射理论<sup>[6~8]</sup>.

### 2.2 光谱响应特性

图 3 产生入射光的仪器是日本岛津公司生产的 UV240 紫外-可见分光光度计,其波长范围 190 ~ 900 nm,准确度  $\pm 0.3 \text{ nm}$ .在室温无偏压下,测得探测器光谱响应范围为 200 ~ 400 nm,响应峰值在 310 nm 处,响应半宽为 85 nm.

SiC 的禁带宽  $E_g = 3.25 \text{ eV}^{[4]}$ ,由上述公式  $h\nu \geq E_g, \lambda\nu = C$ ,可算出  $\lambda \leq 382.2 \text{ nm}$ .如图 3 所示,测得器件对波长大于 382 nm 的入射光响应已经很小,相对峰值响应接近于零,这

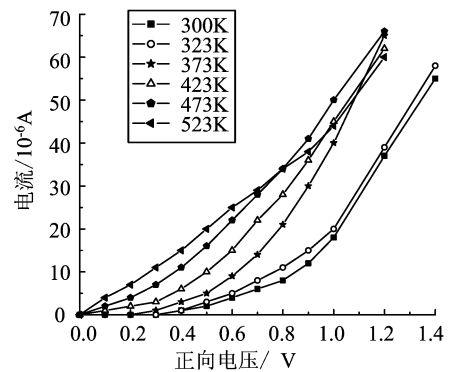


图 2 不同温度下的正向 I-V 曲线

Fig.2 Forward I-V characteristics at different temperatures

与计算结果一致,说明实验与理论符合得较好. 小于 200 nm 的入射光因为波长短,光吸收系数很大,表面复合速度也很大,所以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 4 是美国 Boston Electronics Corporation 生产的 SiC Ultraviolet Photodiodes 的光谱响应曲线. 图 3 与图 4 对照,其响应范围都是 200 ~ 400 nm,但响应峰值与半宽值均不同,这与器件的外延层厚度及制备工艺等因素有关.

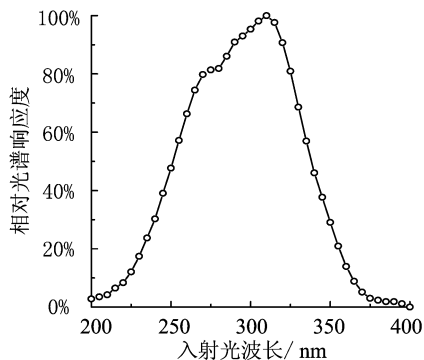


图 3 Au/n-4H-SiC 探测器的光谱响应曲线

Fig. 3 Spectrum response curve of the Au/n-4H-SiC detector

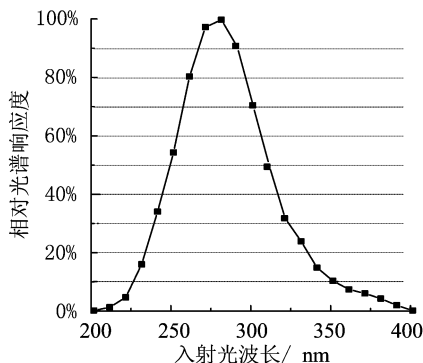


图 4 美国 BEC 的 SiC 紫外光电二极管光谱响应曲线

Fig. 4 Spectrum response curve of a SiC photodiode from American BEC

### 2.3 光谱响应随偏压的变化

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,因为反向漏电流很低,光电流比暗电流大很多,所以光电流的变化容易测试;而正向偏压会导致器件内建电场区的电场强度和耗尽区宽度都减小,从而导致光生载流子复合率大大增加,光电流减小很多;而且,正向开启电压很小,电路导通后正向电流远大于光电流,所以此时光电流的变化很难测试.

图 5 是探测器分别是在无偏压(0 V)、反偏压 5 V 和反偏压 10 V 下测试的,结果显示加反向偏压后光谱响应幅度迅速增大,说明在反偏压下光电流迅速倍增. 这是因为反偏压导致器件内建电场的电场强度增大,光生载流子穿过耗尽区的时间大大缩短,复合率也大大减小,光电流迅速增大. 反偏压对光电流大小的影响程度,跟入射光功率、器件结构等因素有关. 本文器件结构中的 n 型外延层掺杂很小,加反偏压时在该外延层形成高电场区,加速光生载流子穿过耗尽区,所以器件光谱响应度受反偏压影响很大. 在反偏压 10 V 下光谱响应峰值在 300 nm 处,比无偏压时(310 nm)向短波方向移了 10 nm,这是因为反向偏压下耗尽区电场增大,载流子穿过耗尽区的时间迅速缩短,所以原来无偏压或小反压下较短波长的入射光产生的被复合掉的光生载流子,在足够大的反向偏压下,可以在复合前就已穿过耗尽区,在外电路形成光电流,这样响应峰值就往短波方向移动.

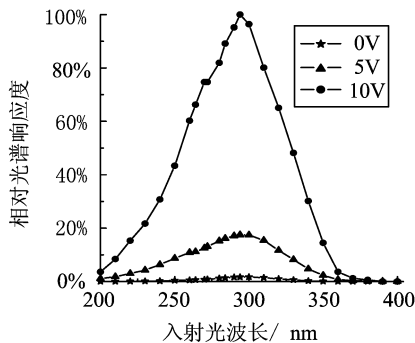


图 5 不同偏压下的光谱响应曲线

Fig. 5 Spectrum response curves at different reverse biased voltages

不过,由于载流子的响应速度是有极限的(受载流子的扩散、耗尽层电容等因素限制)<sup>[6]</sup>,所以响应峰值的移动也是有限的.光谱响应半宽 75 nm,比无偏压时小 10 nm,这是计算相对光谱响应度时的分母(即峰值的响应幅度)迅速增大的结果.

## 2.4 反向漏电流

采用 KEITHLEY MODEL 2000 MULTIMETER 测得反向漏电流(图 6),在室温下器件的短路电流( $V = 0$ )是  $2.4 \times 10^{-12}$  A,在 250 °C 时是  $1.1 \times 10^{-9}$  A;室温下器件在反向电压 30 V 以内漏电流是  $0.58 \times 10^{-10}$  A,且不受反向电压影响;在 100 °C、24 V 反向电压下漏电流是  $0.47 \times 10^{-8}$  A;在 250 °C、24 V 反向电压下的漏电流为  $0.22 \times 10^{-6}$  A;而典型 Si 器件暗电流在 25 °C 下是  $10^{-9}$  A 数量级,在 300 °C 下是  $10^{-3}$  A 数量级<sup>[1]</sup>;由此可见,SiC 器件的暗电流很低,这有利于提高器件的信噪比和响应灵敏度.

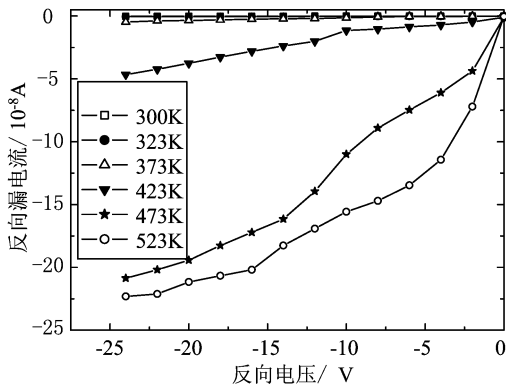


图 6 不同温度下的反向漏电流曲线

Fig. 6 Leakage current curves at different temperatures

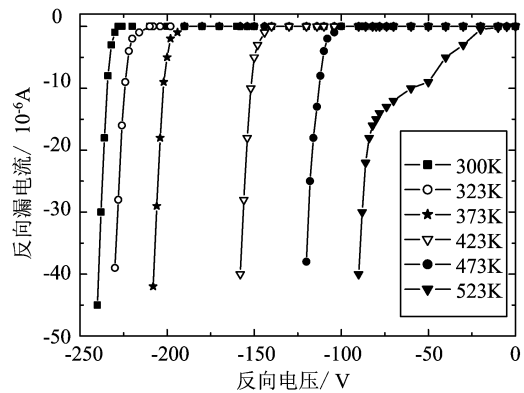


图 7 不同温度下的反向 I-V 曲线

Fig. 7 Reverse I-V characteristics at different temperature

## 2.5 反向击穿电压

用 JT-1GH 型晶体管特性测试仪测得反向击穿电压(图 7):在室温下器件的反向击穿电压为 230 V,在 50 °C 下为 215 V,在 250 °C 下为 80 V,说明器件的反向击穿电压高.250 °C 的曲线在击穿电压前的漏电流比其他 5 条曲线明显增大,80 V 下漏电流是  $0.15 \times 10^{-4}$  A,90 V 下迅速增大到  $0.40 \times 10^{-4}$  A.不过,由图 6 知 250 °C、24 V 下的漏电流才  $0.22 \times 10^{-6}$  A,而由图 5 知 10 V 时器件的光响应灵敏度比 0 V 时提高上百倍,一般器件的工作偏压小于 20 V,所以在 250 °C 下器件仍能很好的工作.

## 2.6 高温特性

在高温下由于半导体禁带变窄,器件的光谱响应特性将向长波方向移动,不过 Glasow 等人发现在 400 °C 下器件对紫外光的响应特性仍保持良好<sup>[1,5]</sup>.由图 2、6、7 知,在 250 °C 下器件的 I-V 特性良好,反向漏电流在工作偏压下小于  $0.22 \times 10^{-6}$  A,说明器件可在 250 °C 以上工作.

## 3 结论

本文报导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 紫外探

测器,器件光谱响应范围为 200 ~ 400 nm,在室温无偏压下,响应峰值在 310 nm 处,响应半宽为 85 nm;反向电压提高器件的光谱响应灵敏度;高温下器件仍保持良好的紫外响应特性.测得器件不同温度下的  $I-V$  特性曲线说明器件性能比较理想,在室温下,正向开启电压为 0.8 V,反向漏电流  $< 10^{-10}$  A,反向击穿电压  $> 200$  V;工作温度大于 250 °C.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 郝跃,彭军,杨银堂. 碳化硅宽带隙半导体技术[ M ]. 北京: 科学出版社,2000. 190-196.
- [ 2 ] Chow Peter P, Klaassen Jody J, VanHove James M, *et al.* Group III-nitride materials for ultraviolet detection applications[ J ]. SPIE Optoelectronics, 2000, 3948:295-303.
- [ 3 ] 杨克武,潘静,杨银堂. SiC 半导体材料及其器件应用[ J ]. 半导体情报,2000,37( 2 ):13-15.
- [ 4 ] Cooper J A Jr, Agarwal A K, Hara K, *et al.* Foreword-Special Issue on Silicon Carbide Electronic Devices[ A ]. James A. Cooper Jr. Special Issue on Silicon Carbide Electronic Devices[ C ]. New York: IEEE, 1999. 442.
- [ 5 ] Brown Dale M, Downey Evan T, Ghezzeo Mario, *et al.* Silicon Carbide UV Photodiodes [ J ]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1993, 40( 2 ):325-333.
- [ 6 ] 施敏(美)著,王阳元,嵇光大,卢文豪译. 半导体器件物理与工艺[ M ]. 北京:科学出版社,1992. 308-315.
- [ 7 ] 刘恩科,朱秉生,罗晋生,等. 半导体物理学[ M ]. 第4版. 北京:国防工业出版社,1997. 178-188.
- [ 8 ] Liang S, Sheng H, Liu Y, *et al.* ZnO Schottky ultraviolet photodetectors[ J ]. Journal of Crystal Growth, 2001, 225:110-113.

## A Study of Silicon Carbide Ultraviolet Detectors

WANG Li-yu, XIE Jia-chun, HU Lin-hui, WANG Ke-yan

( Microelectronics Institute of Physics Department, USTC, Hefei 230026 )

**Abstract:** With wide band semiconductor n-4H-SiC and metal Au used to form Schottky contact, and with alloys TiNiAg used to form ohmic contact on the back, Au/n-4H-SiC Schottky UV detectors have been fabricated. The spectrum response characteristics of the devices have been measured and analyzed. The response wavelength range is from 200 nm to 400 nm. At room temperature without biased voltage, the response peak has been found at 310 nm and the half width of response wavelength is 85 nm. The  $I-V$  characteristics have also been measured. At room temperature, the forward turn-on voltage is 0.8 V, the reverse breakdown voltage is higher than 200 V, and the leakage current is smaller than  $10^{-10}$  A. The devices can work at a temperature higher than 250 °C. The measurement results show that Au/n-4H-SiC Schottky UV detectors have good UV response characteristics and lower leakage current.

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