

台面结构对 4H-SiC 紫外探测器性能的影响*

刘兴昉^{1,2,†} 孙国胜¹ 李晋闽¹ 赵永梅¹ 宁瑾² 王雷¹ 赵万顺¹
罗木昌¹ 李家业¹ 曾一平¹

(1 中国科学院半导体研究所 材料中心, 北京 100083)

(2 中国科学院传感技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 制备了4种具有不同光窗口台面结构的4H-SiC紫外探测器#1, #2, #3和#4,并分别测试了它们的紫外光响应谱.器件制备在4H-SiC同质外延层上,台面为垂直结构,其中探测器#1光窗口区由透明Pt层、p⁺层、p层、n⁻层和n⁺衬底组成.在探测器#1的基础上用离子刻蚀的方法分别剥离透明Pt层、透明Pt层和p⁺层、透明Pt层和p⁺层以及p层制备出探测器#2, #3和#4.器件的紫外光响应谱表明,紫外响应率最好的是探测器#2,其次是探测器#4, #1, #3,其中探测器#2比其他类型的探测器响应率高1个数量级;4种类型的探测器峰值响应位置各不相同,其中探测器#1位于341nm处,探测器#2, #3和#4分别在312,305和297nm处.

关键词: 4H-SiC; 紫外探测器; 台面结构; 光窗口

PACC: 6855; 4280; 4270G

中图分类号: TN304.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0579-04

1 引言

碳化硅材料是第三代宽禁带半导体材料的杰出代表,它的带宽可达3.26eV,具有很高的击穿电场强度,良好的抗辐射性能,耐高温,导热性能好^[1],这些优异性能使碳化硅在微电子、光电子器件和电路中具有广泛的应用前景.基于4H-SiC的紫外探测器具有高的量子效率,低的暗电流,可制备出光盲甚至阳盲型紫外探测器.世界各国的科学工作者已经研制出多种具有不同结构的4H-SiC紫外探测器,在这此结构中,pn结型结构^[2]被广泛研究,并且出现了许多基于pn结改进型的结构,比如基于4H-SiC的p⁺-n结构^[3],基于6H-SiC的p-i-n结构^[4],基于4H-SiC的雪崩倍增式pn结构^[5,6]等.本文制备了基于4H-SiC的p⁺/p/n⁻/n⁺结构的探测器,并在此基础上制备了具有不同光窗口台面结构的4H-SiC紫外探测器,比较研究了它们的紫外探测效率,并对其探测机理进行了分析.

2 实验

4H-SiC同质外延是在国产低压化学气相沉积(LPCVD)设备中完成的,衬底为从美国Cree公司

购买的n⁺型Si面朝<11 $\bar{2}$ 0>晶向偏8°的4H-SiC单晶体,外延生长过程中碳源和硅源分别是乙烯(纯度99.9998%)和硅烷(纯度99.99995%),流量分别为0.6和0.5sccm,载气为氢气(纯度99.998%),流量为5slm,p型原位掺杂剂是硼烷,流量为0.1sccm.反应温度为1500℃,具体外延生长工艺流程可参见文献[7].在衬底上依次外延了如下三层4H-SiC:2000nm厚的n⁻层,200nm厚的p层和200nm厚的p⁺层,它们的掺杂水平依次为2×10¹⁷,3×10¹⁸和2×10¹⁹cm⁻³.

探测器#1的制备工艺过程如下:先用ICP刻蚀出500nm深的光窗口凸台面,此光窗口面积为300μm×300μm,然后用PEVCD淀积500nm的SiO₂作为钝化层.将光窗口区的SiO₂腐蚀掉,露出p⁺层,溅射50nm的透明Pt层.此Pt层一方面可作为p⁺的欧姆接触层,另一方面,存在于光窗口区的Pt金属主要用于强化探测器内部有源区的工作电场.它必须透明,可以使紫外光线通过,背面的n⁺欧姆接触用Ni,使用Cr/Au合金制备p⁺和n⁺电极.用O²⁺作为源气剥离上述结构的光窗口区,严格控制剥离深度,在探测器#1的工艺基础上分别剥离透明Pt层、透明Pt层和p⁺层、透明Pt层和p⁺层以及p层,制备出探测器#2, #3和#4.制备出的探测器台面结构如图1所示.

* 国家重点基础研究发展规划(批准号:2006CB6049)和国家自然科学基金(批准号:0713170000,60406010)资助项目

† 通信作者. Email: liuxf@mail.semi.ac.cn

2006-12-12 收到, 2006-12-28 定稿

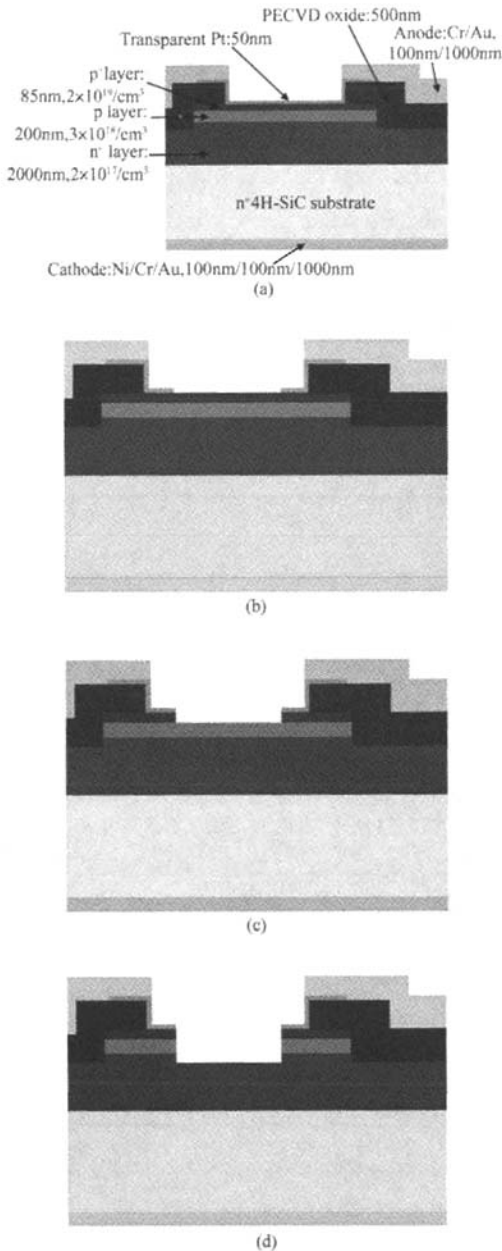


图 1 4H-SiC 探测器台面结构示意图 (a) #1; (b) #2; (c) #3; (d) #4

Fig. 1 Mesa structures of 4H-SiC photodetector (a) #1; (b) #2; (c) #3; (d) #4

3 结果与讨论

测试了 4 种器件在波长范围为 200~400nm 的紫外光响应谱. 测试设备如图 2 所示, 紫外光源为

70 W 的氙灯源, 光路经单色仪和斩波器调制后聚焦, 并经一市售紫外增强型 Si 探测器校准光波长. 探测器样品放于三轴旋转台上, 用一台 KEITHLEY 617 可编程电压表测量光电流, 并记录光电流和光波长的对应曲线关系.

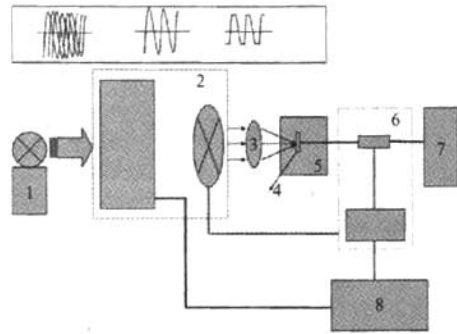


图 2 紫外探测器测试系统光路和电路连接示意图 (1)70 W 的氙灯源; (2)Jobin Yvon H25 (集成了斩波器的单色仪); (3)紫外透镜; (4)测试样品; (5)三轴样品旋转台; (6)KEITHLEY 617 可编程电表; (7)直流电源; (8)计算机系统. 插图: 光波长变化示意图

Fig. 2 Configuration of the circuit and light for ultra-violet detection system (1) 70W Xe light source; (2) Jobin Yvon H25 (monochromator integrated with chopper); (3) Ultraviolet lens; (4) Ultraviolet photodiode; (5) XYZ translator box; (6) KEITHLEY 617 programmable electrometer for DC mode measurement; (7) DC power supply; (8) Computer. Inset: sketch map of optical wavelengths in the test system.

图 3 为零偏压下 4 种紫外探测器的紫外响应结果. 从图中可以看出, 紫外响应率最好的是探测器 #2, 其次是探测器 #4, #1, #3, 其中探测器 #2 的响应度远高于其他 3 种类型的探测器响应度, 至少高 1 个数量级, 如图 3(a) 所示. 其次为探测器 #1 和 #4 的响应度, 这两种类型的响应度比较接近, 探测器 #4 的略高于探测器 #1 的, 如图 3(b) 所示, 响应度最低的是探测器 #3. 4 种类型的探测器峰值响应位置各不相同, 其中探测器 #1 位于 341nm 处, 探测器 #2, #3 和 #4 分别位于 312, 305 和 297nm 处.

探测器 #1 和 #2 的结构差别在于前者光窗口被一透明 Pt 金属层覆盖, 从两者的响应度来看, 透明 Pt 层对紫外探测率是有负作用的, 这可能是因为 Pt 金属层对紫外光具有吸收、反射作用^[8], 使得探测器 #1 的外量子效率降低, 从而降低了它的响应度. 另一方面, Pt 金属层对探测器的红移起了很大的作用, 这可能是 Pt 层强化了有源区的电场, 使得位于 Pt 层下 pn 结的 p 侧产生了更大的耗尽区深

度^[6],从而 p 层比结另一侧的 n 层有更高的紫外响应度^[9].由于剥离了探测器 #3 光窗口的台面结构

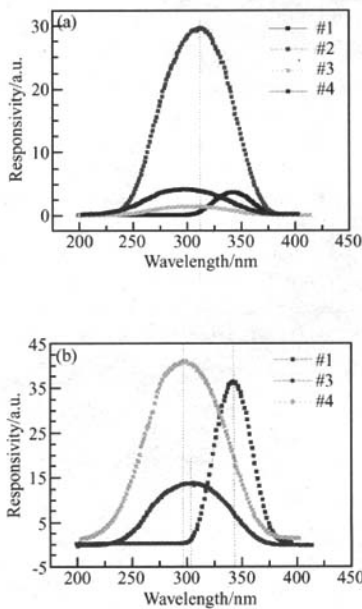


图3 零偏压下紫外探测器紫外响应度与波长的关系曲线 (a)探测器 #1, #2, #3 和 #4; (b)探测器 #1, #3 和 #4 图中竖直线为峰值响应参考线。

Fig.3 Ultraviolet photoresponse spectra of 4H-SiC photodetectors at zero bias (a) Photodetectors #1, #2, #3, and #4; (b) Photodetectors #1, #3, and #4

中的 Pt 金属层和 p⁺ 层,探测器 #3 有源区不能形成有效的电场,虽然有大量光生电子和空穴在 p 层形成,但由于缺乏有效电场,它们不能被快速地扫向正负电极,同时电子的扩散长度很小,所以它们在有源区内很快复合了,因此光电流很小,器件的响应度很低.将光窗口区的 p 层也剥离掉后(探测器 #4),探测器的响应度又大幅上升,甚至超过了探测器 #1 的响应度.虽然探测器 #4 的有源区也缺乏有效电场,但是大量光生电子和空穴在 n⁻ 层形成,空穴的扩散长度远大于电子的,所以光生载流子复合的几率比较小,光电流比探测器 #3 的大很多,甚至超过了探测器 #1 的光电流.

从以上分析可以看出,探测器 #2 具有最好的紫外探测效率,探测器 #1 和 #4 分别具有最长和最短的峰值响应波长.如果进一步优化有源区的台面结构,可以设计出具有高响应度、峰值响应波长可调的 4H-SiC 紫外探测器.

4 结论

在国产的低压化学气相沉积设备(LPCVD)上外延生长了多层 4H-SiC 同质外延膜并进行了原位 p 型掺杂,各外延层厚度和掺杂情况分别为 2000nm 厚的 n⁻ 层($2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$),200nm 厚的 p 层($3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)和 200nm 厚的 p⁺ 层($2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).在此基础上制备了 4 种具有不同光窗口台面结构的 4H-SiC 紫外探测器 #1, #2, #3 和 #4,并分别测试了它们的紫外光响应谱.器件台面为垂直结构,其中探测器 #1 光窗口区由透明 Pt 层、p⁺ 层、p 层、n⁻ 层和 n⁺ 衬底组成,在探测器 #1 的基础上用离子刻蚀的方法分别剥离透明 Pt 层、透明 Pt 层和 p⁺ 层、透明 Pt 层和 p⁺ 层以及 p 层制备出探测器 #2, #3 和 #4.器件的紫外光响应谱表明,紫外响应率最好的是探测器 #2,其次依次是探测器 #4, #1, #3,其中探测器 #2 比其他类型的探测器响应率高 1 个数量级;4 种类型的探测器峰值响应位置各不相同,其中探测器 #1 位于 341nm 处,探测器 #2, #3 和 #4 分别在 312, 305 和 297nm 处,探测器 #1 和 #4 分别具有最长和最短的峰值响应波长.如果进一步优化有源区的台面结构,可以设计出有高响应度、峰值响应波长可调的 4H-SiC 紫外探测器.

参考文献

- [1] Powell A R, Rowland L B. SiC materials: progress, status, and potential roadblocks. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 90: 942
- [2] Zhou Y H, Zhang Y M, Zhang Y M, et al. Simulation and analysis of 6H-SiC pn junction ultraviolet photodetector. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(11): 3710
- [3] Violina G N, Kalinina E V, Kholujanov G F, et al. Photoelectric properties of p⁺-n junctions based on 4H-SiC ion-implanted with aluminum. *Semiconductors*, 2002, 36(6): 706
- [4] Torvik J T, Pankove J I, van Zeghbroeck B J. Comparison of GaN and 6H-SiC p-i-n photodetectors with excellent ultraviolet sensitivity and selectivity. *IEEE Trans Electron Devices*, 1999, 46(7): 1326
- [5] Banc C, Bano E, Ouisse T, et al. Photon emission analysis of defect-free 4H-SiC pn diodes in avalanche regime. *Silicon Carbide and Related Materials*, 2001, Pts 1 and 2. *Proceedings*, 2002, 389-3: 1293
- [6] Yan Feng, Zhao J H, Olsen G H. Demonstration of the first 4H-SiC avalanche photodiodes. *Solid-State Electronics*, 2000, 44: 341
- [7] Sun Guosheng, Gao Xin, Zhang Yongxing, et al. Homoepitaxial growth and characterization of 4H-SiC epilayers by low-pressure hot-wall chemical vapor deposition. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(12): 1549
- [8] Palik E D. *Optical constants of materials*. San Diego, Academic, 1985
- [9] Razeghi M, Rogalski A. *Semiconductor ultraviolet detectors*. *J Appl Phys*, 1996, 79(10): 7433

Effect of Mesa Structures on the Responsivities of 4H-SiC Photodetectors*

Liu Xingfang^{1,2,†}, Sun Guosheng¹, Li Jinmin¹, Zhao Yongmei¹, Ning Jin², Wang Lei¹,
Zhao Wanshun¹, Luo Muchang¹, Li Jiaye¹, and Zeng Yiping¹

(1 *Novel Semiconductor Material Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(2 *State Key Laboratory of Transducer Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: Four types of 4H-SiC photodetectors, # 1, # 2, # 3 and # 4, with different mesa structures in the area of the optical window have been fabricated and characterized by the photoresponse spectra. The vertical photodetectors were based on 4H-SiC homoepilayers. The optical window of photodetector # 1 consisted of a transparent Pt layer and a $p^+/p/n^-$ layer upon the n^+ substrate; and that of photodetector # 2, # 3 and # 4 consisted of a $p^+/p/n^-$ layer, a p/n^- layer and a n^- layer, respectively. The photoresponse results showed that the best ultraviolet photoresponsivity was of the photodetector # 2, with at least an order of magnitude higher than that of the other three types of photodetectors. It also showed that the wavelength of the peak value varied according to mesa structures, and the wavelengths were 341nm, 312nm, 305nm and 297nm for photodetector # 1, # 2, # 3 and # 4, respectively.

Key words: 4H-SiC; ultraviolet photodetector; mesa structures; optical window

PACC: 6855; 4280; 4270G

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0579-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2006CB6049) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 0713170000, 60406010)

† Corresponding author. Email: liuxf@mail.semi.ac.cn

Received 12 December 2006, revised manuscript received 28 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics