

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461. 2011.06.016

## 4H-SiC 紫外光电探测器光电特性随温度变化的研究

郑云哲<sup>1,2</sup>, 林冰金<sup>1</sup>, 张明昆<sup>1,3</sup>, 蔡加法<sup>1,2</sup>, 陈厦平<sup>1,2</sup>, 吴正云<sup>1,3</sup>

(1 厦门大学物理系, 福建 厦门 361005;

2 福建省半导体材料及应用重点实验室, 福建 厦门 361005;

3 厦门大学萨本栋微米纳米技术研究中心, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 利用光电流谱法研究了 300 K 到 60 K 温度范围内的 p-i-n 结构 4H-SiC 紫外光电探测器的暗电流及相对光谱响应特性。研究发现随着温度的降低, 探测器的暗电流和相对光谱响应都逐渐减小; 而且, 反向偏压越高, 暗电流减小的速率越大。在零偏压下, 随着温度的降低, 器件的相对光谱响应的峰值波长先向短波方向移动, 后向长波方向移动, 在 60 K 时移至 282 nm 附近; 同时观察到探测器的相对光谱响应范围略有缩小。此外, 我们对器件 p、i、n 各层产生的光电流随温度变化的机理进行讨论, 提出了通过减少 i 层缺陷和适当减小 n 层掺杂浓度的方式来提高器件的相对光谱响应。

**关键词:** 光电子学; 4H-SiC; p-i-n 紫外光电探测器; 温度特性; 光电特性

**中图分类号:** O472.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-5461(2011)06-0737-05

## Photoelectric properties of 4H-SiC UV photodetector at various temperatures

ZHENG Yun-zhe<sup>1,2</sup>, LIN Bing-jin<sup>1</sup>, ZHANG Ming-kun<sup>1,3</sup>,  
CAI Jia-fa<sup>1,2</sup>, CHEN Xia-ping<sup>1,2</sup>, WU Zheng-yun<sup>1,3</sup>

(1 Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2 Fujian Key Laboratory of Semiconductor Materials and Application, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

3 Pen-Tung Sah Micro-Nano Technology Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The dark current and relative spectral response of 4H-SiC ultraviolet p-i-n photodetector were investigated with the temperature decreasing from 300 K to 60 K by photocurrent measurement. It is found that the dark current and relative spectral response of the device declined during the whole period and that the higher the reverse bias voltage is, the faster the falling rate of dark current are. At the reverse bias of 0 V, when the temperature dropped, the peak response wavelength of the device firstly shifted slowly to the short wavelength direction and then moved to the opposite direction, reaching around 282 nm at 60 K. Meanwhile, a little narrowing of relative spectral response of the device was observed. Furthermore, the mechanism of influences of temperature on photocurrent produced in p, i, n layers were investigated, and proposal lessening defect in i layer and reducing properly doping concentration in n layer were proposed to enhance the relative spectral response of the device.

**基金项目:** 福建省自然科学基金资助项目 (2009J05151)

**作者简介:** 郑云哲 (1984 -), 女, 河北人, 研究生, 主要从事宽禁带半导体材料与光电器件的研究。

**E-mail:** zhengyunzhe@126.com

**导师简介:** 吴正云 (1957 -), 福建人, 博士生导师, 主要从事纳米低维半导体材料及器件的研制和光电性质的研究。

**E-mail:** zhywu@xmu.edu.cn

**收稿日期:** 2010-12-14; **修改日期:** 2011-03-14

Key words: optoelectronics; 4H-SiC; p-i-n UV photodetector; temperature dependence; photoelectric properties

## 1 引言

碳化硅 (SiC) 作为第三代宽禁带半导体材料代表之一, 具有禁带宽度大 ( $\sim 3.23$  eV)<sup>[1]</sup>、击穿电场强度高、电子饱和漂移速度大、热导率高及抗辐照性能强等优点, 且材料生长技术成熟, 因此成为制备紫外光电探测器的重要选择。目前紫外光电探测器的主要结构有肖特基结构、p-i-n 结构、雪崩结构、MSM 结构和光电导型等。其中 p-i-n 结构紫外光电探测器由于具有暗电流较低、响应速度较快、制备工艺相对简单及紫外可见抑制比较高等优点<sup>[2,3]</sup> 而备受重视。

随着空间科学的发展, 航空航天及太空环境监测等要求光电探测器能够在较宽的温度范围内保持良好的性能。半导体器件的性能与工作温度有很大的关系, 因此研究光电探测器的光电特性随温度变化特点, 尤其是低温下的变化特点具有重要的理论和实际意义。目前, 国内外关于 4H-SiC 材料的 p-i-n 结构二极管正向特性以及肖特基结构, 雪崩结构光电探测器 (APD) 的温度特性方面的研究已有报道<sup>[4~7]</sup>, 比如 Ho-Young Cha 等发现吸收雪崩分离结构 4H-SiC 探测器 (SAM-APD) 光谱响应曲线在室温以上时随温度升高向长波方向移动且响应度逐渐增高。p-i-n 结构 4H-SiC 光电探测器对日盲区探测具有重要应用, 然而目前这种结构的探测器在低温下光电特性的研究还未见报道。本文研究了温度变化对 p-i-n 结构探测器光电特性的影响, 并对其物理机制进行了探讨, 从而为紫外光电探测器在较宽温度范围内的应用提供参考。

## 2 实验

实验所用样品为本课题组研制的台面式 p-i-n 结构 4H-SiC 紫外光电探测器<sup>[8]</sup>, 器件的光学窗口面积为  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ , n 型电极选用 Ni/Au, p 型电极选用 Ti/Al/Au, 钝化层为氮化硅 / 氧化硅 ( $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_x$ ) 复合介质层结构, 并在其上制作压焊电极, 划片, 引线焊接, 盖帽封装后进行综合测试。

用课题组自行搭建的变温紫外光电探测器光电性能测试系统进行器件的暗电流和光电流的测量。光源为 450 W 紫外增强型氙弧灯, 光线经单色仪分光后, 经透镜聚焦透过石英窗口照射到样品上。样品固定于无氧铜样品架上, 样品架安装在闭循环低温制冷器的低温头上。反向偏置电压源由 Keithley 2410 源表提供, 电流用 Keithley 6514 静电计表测量。变温测量过程由 Lakeshore 330 控温仪监控样品温度。系统采用 Labview 软件进行自动化控制和数据采集。实验测量了 300 K 到 60 K 范围内探测器的暗电流特性, 以及波长范围在 200 ~ 380 nm 的相对光谱响应特性。

## 3 测试和讨论

### 3.1 暗电流温度特性

暗电流是光电探测器一个十分重要的性能指标, 它决定了器件探测率的大小, 暗电流越小, 器件的探测率越高。因此尽量减小暗电流, 对提高光电探测器的性能就显得非常重要。

图 1 显示了不同反向偏压下, 探测器暗电流随温度的变化情况。相同反向偏压下, 暗电流随温度降低逐渐减小, 而且反向偏压越高, 暗电流随温度降低而减小的幅度越大。当反向偏压为 5 V 时, 探测器在温度为 60 K 时的暗电流比 280 K 时下降了约 60%, 当反向偏压增加到 10 V 时则下降了约 90%。光电探测器的暗电流由体内电流和表面电流两部分组成。随着温度的降低, 电子空穴的寿命变长, 少数载流子的扩散系数变小, 而且界面复合速度减小, 导致产生 - 复合电流, 扩散电流和表面暗电流减小<sup>[9,10]</sup>, 因此光电探测器的暗电流随温度降低而减小。暗电流减小有利于探测器信噪比的提高, 这表明探测器在低温下对低亮

度的紫外线检测性能有所提高。

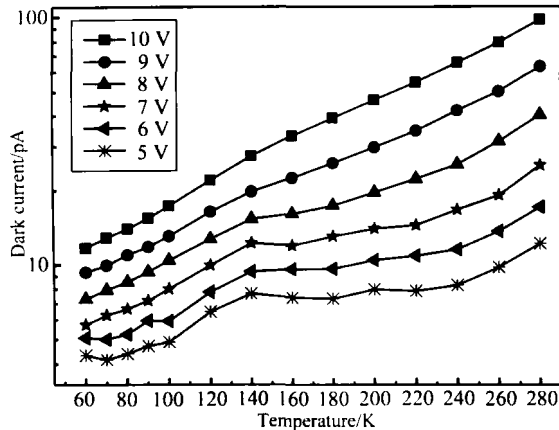


Fig.1 Dark current of device as a function of temperature under different reverse biases using a semi-log scale

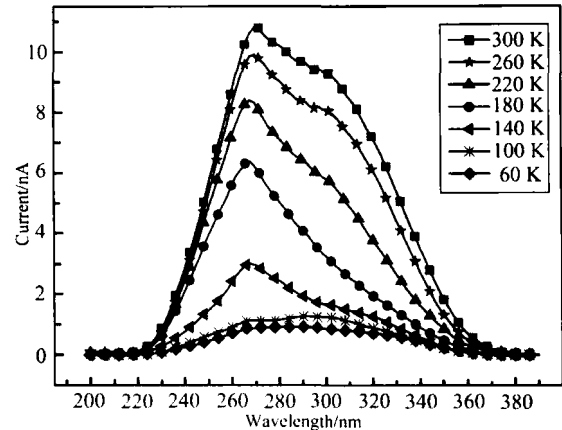


Fig.2 Relative spectrum response of devices at different temperatures at 0 V bias

### 3.2 相对光谱响应温度特性

探测器的光谱响应曲线反映了器件对各波长入射光的响应灵敏度,从而决定了器件的应用范围,而温度变化对光谱响应特性产生了重要影响。如图 2 所示,零偏压下,温度为 300 K 时,探测器的相对光谱响应的峰值波长在 272 nm 附近,随着温度的降低,峰值响应波长先向短波方向移动,后向长波方向移动,在温度降低到 60 K 时,峰值响应波长移至 282 nm 附近。温度为 300 K 时,探测器的紫外可见抑制比约为 400,而当温度降低时,探测器的紫外可见抑制比变化很小,说明该探测器在低温下仍具有较好的紫外探测性能。

从图 2 中还可以观察到,零偏压下,不同波长入射光产生的光电流随温度降低而减小的速率不同,反映出探测器 p, i, n 三层结构的光谱响应温度特性不同。波长较短处的相对光谱响应主要来自 p 层光吸收的贡献,此处光电流受温度影响较小,说明 p 层的光电转换机制受温度影响较小。

相对光谱响应在中间波长处的光电流随温度降低而减小的趋势最为明显,此处光电流主要来自探测器 i 层的光吸收。碳化硅材料中存在微管等缺陷,在空间电荷区电场作用下,这些缺陷作为陷阱可同时束缚一对或多对光生电子空穴<sup>[11]</sup>,经过一段时间后,这些被束缚的光生电子空穴对通过隧道效应复合,因而对光电流没有贡献。当温度较高时,由于电子空穴具有的动能较大,很难被陷阱束缚,此时的缺陷对光电流的影响不明显。温度降低,材料缺陷对光生电子空穴对的束缚增强,因此,光电流随温度降低出现较快地减小。温度继续降低,陷阱对电子空穴的束缚逐渐趋于饱和,光电流的变化不再明显。因此,减少 i 层材料缺陷对于改善探测器低温条件下的光响应度具有重要意义。

相对光谱响应长波部分入射光产生的光电流主要来自 n 层和 i 层靠近衬底部分光吸收的贡献。首先,随温度降低, i 层缺陷对光生电子空穴的束缚有所增强。其次, 4H-SiC 材料的禁带宽度随温度降低而增宽。另外,空穴扩散长度随温度降低而减小<sup>[10]</sup>,都会引起探测器长波部分光电流的减小。

基于以上讨论,可以通过减少 i 层缺陷和适当减小 n 层的掺杂浓度以增大空穴的扩散长度,进而达到提高低温下探测器光谱响应的目的。

另外,我们还对探测器相对光谱响应范围的温度特性进行了研究,以期对探测器的光电转换机制随温度变化有更多的了解。

### 3.3 相对光谱响应长波段温度特性

图 3 给出了零偏压下,长波段相对光谱响应接近为零附近的相对光谱响应情况。可以观察到,随着温

度的降低,长波段光谱出现蓝移现象。原因可能是材料禁带宽度随温度降低而变宽引起的。4H-SiC 材料禁带宽度随温度变化的 Varshni 经验公式为

$$E_g(T) = E_g(0) - aT^2/(T + b), \quad (1)$$

其中  $E_g(0) = 3.26 \text{ eV}$ ,  $a = 6.50 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ ,  $b = 1.30 \times 10^3 \text{ K}^{[1]}$ 。由此可见 4H-SiC 材料禁带宽度随温度降低而增宽,因此其相对光谱响应的长波段光谱随温度降低出现蓝移现象。

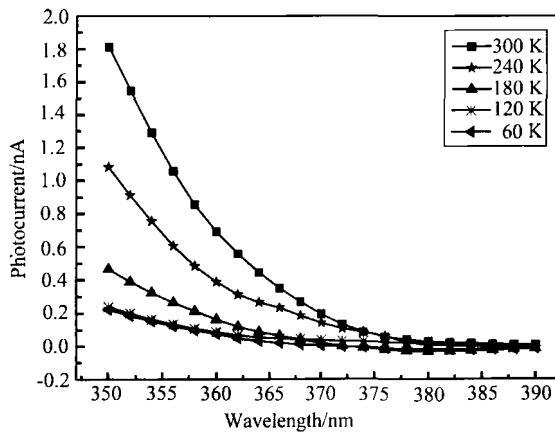


Fig.3 Relative spectrum response of device near the cut-off at long wavelength

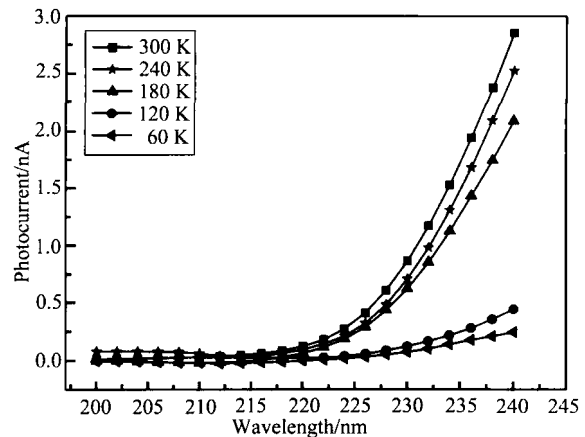


Fig.4 Relative spectrum response of device near the cut-off at short wavelength

### 3.4 相对光谱响应短波段温度特性

图 4 为零偏压下,短波段相对光谱响应接近为零附近的温度特性。随着温度的降低,相对光谱响应短波段光谱向长波方向移动。文献报道<sup>[11]</sup> 光生电子空穴有可能在空间电荷区形成激子,波长较短的入射光激发产生的跃迁有一部分发生在 4H-SiC 导带和价带近似平行处,此处光生电子空穴形成的激子有效质量大且能量较高,因此,有可能以激子的形式运动到电极的一侧,对光电流不产生贡献。随着温度的降低,4H-SiC 禁带宽度变宽,导带和价带发生变化,有可能导致激子产生的几率增加,光生电子空穴对光电流的贡献减小,因此激子产生几率随温度降低而增加可能是相对光谱响应短波段光谱向长波方向移动的原因,此光谱移动现象在温度为 500 K 和 300 K 的光谱响应<sup>[10]</sup> 中也曾观察到。

## 4 结 论

利用光电流谱法对 p-i-n 结构 4H-SiC 紫外光电探测器暗电流及相对光谱响应温度特性进行了研究。结果表明,相同反向偏压下,暗电流随温度的降低而减小,10 V 反向偏压下,探测器在 60 K 时的暗电流比 280 K 时下降了约 90%,说明探测器信噪比在低温下有显著的提高。零偏压下,当温度降低时,探测器的相对光谱响应的峰值波长先向短波方向移动,后向长波方向移动;然而,探测器的紫外可见抑制比变化不大,探测器在低温下仍具有较高的紫外可见抑制比。

零偏压下,随着温度的降低,不同波段入射光产生的光电流随温度降低而减小的速率不同。反映出探测器 p, i, n 三层光电转换机制受温度影响的程度不同。其中,相对光谱响应短波部分的光电流受温度影响较小,说明 p 层光电转换机制受温度影响较小。

相对光谱响应在中长波段附近产生的光电流随温度降低而减小的趋势最为明显,此处光电流主要来自探测器 i 层和 n 层处的光吸收,光电流变化的原因可能是随着温度降低,探测器 i 层缺陷对光生电子空穴对的束缚增强,4H-SiC 材料禁带宽度增宽和空穴扩散长度减小等因素综合作用的结果。因此提高 i 层材

料质量,适当减小n层的掺杂浓度,将有助于改善低温条件下探测器的工作性能。

最后,我们还探讨了探测器的相对光谱响应范围随温度降低略有缩小的原因。零偏压下,探测器长波段相对光谱响应接近为零,光谱随温度降低出现蓝移,主要原因是材料的禁带宽度随温度降低变大造成的;而探测器短波段相对光谱响应接近为零,光谱向长波方向移动的原因可能是材料能带结构随温度降低发生改变,主要由短波产生的激子形成几率增加,从而使光电流减小,因此短波段光谱向长波方向移动。

#### 参考文献:

- [1] Levinshtein M E, Rumyantsev S L, Shur M S. *Properties of Advanced Semiconductor Materials*[M]. New York: Wiley, 2001: 96-118.
- [2] Hao Yue, Peng Jun, Yang Yintang. *SiC Wide-bandgap Semiconductor Technology (碳化硅宽禁带半导体技术)*[M]. Beijing: Science Press, 2000: 190-196 (in Chinese).
- [3] Gupta S K, Azam A, Akhtar J. Experimental analysis of I-V and C-V characteristics of Ni/SiO<sub>2</sub>/4H-SiC system with varying oxide thickness [J]. *Microelectronics International*, 2010, 27(2): 106-112.
- [4] Pezzimenti F, Albanese L, F, Bellone S, et al. Analytical model for the forward current of Al implanted 4H-SiC p-i-n diodes in a wide range of temperatures [J]. *IEEE BCTM*, 2008, 13(4): 214-217.
- [5] Blank T V, Goldberg Y A, et al. Temperature dependence of the performance of ultraviolet detectors [J]. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 2003, 509(1-3): 109-117.
- [6] Liang Jin, Xie Jiachun, et al. Temperature characteristics of Au/n-4H-SiC Schottky UV photodiode [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics (量子电子学报)*, 2005, 22(6): 932-934 (in Chinese).
- [7] Cha H Y, Soloviev S, Zelakiewicz S, et al. Temperature dependent characteristics of nonreach-through 4H-SiC separate absorption and multiplication APDs for UV detection [J]. *IEEE Sens. J.*, 2008, 8(3): 233-237.
- [8] Chen X P, Zhu H L, Cai J F, et al. High-performance 4H-SiC-based p-i-n photodetector [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, 102: 024505.
- [9] Chen Xiaping. *Research and Fabrication of 4H-SiC Ultraviolet p-i-n Photodiodes and Linear Array (p-i-n 结构 4H-SiC 紫外光电二极管单管及一维阵列的研制)* [D]. Xiamen: Doctorial Dissertation of Xiamen University, 2007 (in Chinese).
- [10] Cha H Y, Sandvik PM. Electrical and optical modeling of 4H-SiC avalanche photodiodes [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2008, 47(7): 5423-5425.
- [11] Blank T V, Goldberg Yu A, Kalinina E V, et al. Temperature dependence of the photoelectric conversion quantum efficiency of 4H-SiC Schottky UV photodetectors [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, 20(8): 710-715.