

# 砷掺杂基区 n-on-p 长波光伏碲镉汞探测器的光电特性

刘 斌, 周文洪, 李海滨, 邓 屹, 胡晓宁  
(中国科学院上海技术物理研究所材料中心, 上海 200083)

**摘 要:**报道了砷掺杂基区 n-on-p 长波碲镉汞平面结器件的电流电压特性、光谱响应特性, 并同 p 型汞空位 n-on-p 长波碲镉汞平面结器件进行对比分析, 发现砷掺杂基区长波器件的很多性能如优值  $R_0A$ 、电流响应率、黑体探测率都要优于汞空位基区长波器件。

**关键词:**碲镉汞; 光伏探测器; 砷掺杂;  $R_0A$ ; 暗电流

**中图分类号:** TN303

**文献标识码:** A

## Electro-optical characteristics of arsenic-doped base region long-wavelength HgCdTe n-on-p photodiode detector

LIU Bin, ZHOU Wen-hong, LI Hai-bin, DENG Yi, HU Xiao-ning

(Center of Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The current-voltage and spectral response characteristics of arsenic-doped base region long-wavelength HgCdTe n-on-p planar photodiode are reported in this paper. The arsenic-doped base region long-wavelength HgCdTe n-on-p planar photodiode was compared and analyzed with Hg vacancy long-wavelength HgCdTe n-on-p planar photodiode, and it was found that the performance of the former was superior to the latter, such as the  $R_0A$  products, the current responsivity, and the blackbody detectivity.

**Key words:** HgCdTe; photodiode; arsenic-doped;  $R_0A$ ; dark-current

### 1 引 言

近年来,随着碲镉汞(HgCdTe)红外焦平面(IR-FPA)技术的快速发展,器件对材料的电学性质、面积和均匀性等参数的要求迅速提高。要实现载流子在较大范围内的浓度控制以满足各类器件的要求,就必须采用非本征掺杂技术。HgCdTe 薄膜的 p 型掺杂是现代 HgCdTe 外延工艺中的关键技术,是提高红外焦平面探测器性能、制备异质结长波焦平面探测器、多色焦平面探测器的基础。传统的 n-on-p 型 HgCdTe 红外焦平面探测器的光吸收层采用 p 型 Hg 空位掺杂的 HgCdTe 材料。Hg 空位除了提供 p 型导电的空穴以外,而且还作为点缺陷在 HgCdTe 材料中引入深能级,作为 SRH 复合中心,通过 SRH 复合作用使材料的低温少子寿命大大降

低,导致器件量子效率降低。另外,原位退火获得的 Hg 空位掺杂 p 型材料,载流子浓度调节范围很小,而多层复杂器件结构需要 p 型载流子浓度在  $10^{15} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  范围内变化<sup>[1]</sup>, Hg 空位掺杂明显不能满足要求,而且 Hg 空位在 HgCdTe 材料中不稳定,所以,利用掺杂源进行 p 型掺杂是必须的。而当人们试图将探测器的响应波段提高到  $10.5 \mu\text{m}$  以上时,由少子寿命决定的器件结阻抗的下降使得探测器的性能大为降低,为此,以提高少子寿命为目的的 p 型掺杂技术的研究成为碲镉汞材料研究的热点<sup>[2-4]</sup>。

作者简介:刘 斌(1983-),男,硕士研究生,研究方向为半导体器件。E-mail:liubin@mail.sitp.ac.cn

收稿日期:2008-10-29

本文对砷掺杂基区长波碲镉汞平面结器件进行了电流电压、光谱响应、电流响应率和黑体探测率等各项测试,另外还进行了电流电压变温测试相关的研究,并对测试结果进行了分析。

## 2 实验

### 2.1 材料生长和器件制备

为了比较砷掺杂基区长波器件性能的好坏,我们选用组分接近的汞空位基区长波器件进行对比。砷掺杂器件采用 LPE 技术,在碲锌镉衬底上生长组分为  $x=0.2312$ ,砷掺杂浓度为  $3.94 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  和厚度为  $9.51 \mu\text{m}$  的 p 型  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料;汞空位基区长波器件采用 MBE 技术,在 GaAs 衬底上生长组分为  $x=0.2311$ ,汞空位掺杂浓度为  $7.47 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  和厚度为  $9.43 \mu\text{m}$  的 p 型  $\text{HgCdTe}$  材料。这两种材料分别经过  $\text{B}^+$  注入形成 n 区,再长  $\text{ZnS} + \text{CdTe}$  双层钝化膜、镀金金属电极和制备钢柱,获得了砷掺杂和汞空位 n-on-p 平面结的长波碲镉汞光伏器件。图 1 是砷掺杂基区碲镉汞 n-on-p 平面结的剖面示意图。

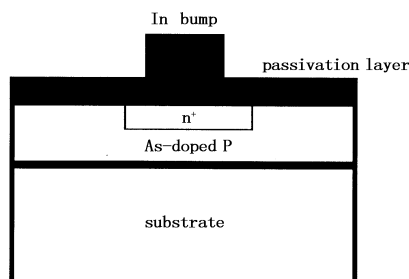


图 1  $\text{B}^+$  注入的 n-on-p 平面结器件

### 2.2 测试

器件电流电压测试用 Keithley236SourceMeter, 测量用电压触发,同时测量电压和电流。器件的响应光谱用 Thermo Nicolet NEXUS 670 型傅里叶红外光谱仪测量,采用常规的单元器件黑体响应方法测量器件的响应率和探测率等性能,测量时的黑体温度为 500K,调制频率为 800Hz,等效噪声带宽 80Hz。器件变温测试使用制冷机控温,温度测量的误差小于 1K,待测样品用低温胶贴在制冷机冷头上。测量时,冷头上加有冷屏,使样品处于暗场下,变温测量的范围为 40~200K。

## 3 实验结果和讨论

### 3.1 两种长波器件光电性能比较

两种器件与测试宝石片互联后,封装在杜瓦内。使用 Keithley236 在 77K 左右进行  $I-V$  测试,并微分得到动态阻抗  $R$ 。图 2 是测试中的多元的  $IV-RV$

图,从图 2 可以看出,在零偏附近及反向偏压下,砷掺杂长波器件的动态阻抗比汞空位长波器件要高,尤其是反向较小偏压下,比汞空位要高一个数量级,而在较大正偏下,砷掺杂长波器件的动态阻抗又比汞空位要小。这是因为:在较小反偏下,暗电流机制由缺陷辅助隧穿电流和产生复合电流决定,而汞空位作为缺陷中心,使得汞空位的缺陷辅助隧穿电流、产生复合电流比砷掺杂器件要大很多,动态阻抗就比砷掺杂器件小很多;而在零偏附近时,暗电流主要是由产生复合电流和扩散电流决定,由于汞空位器件此时少了缺陷辅助隧穿电流的影响,两者动态阻抗之间的差距减小;而在较大正偏时,电流机制主要由扩散电流决定,而砷掺杂器件扩散长度一般比汞空位要长,扩散电流就比汞空位器件要大,所以正向动态阻抗比汞空位器件要小。

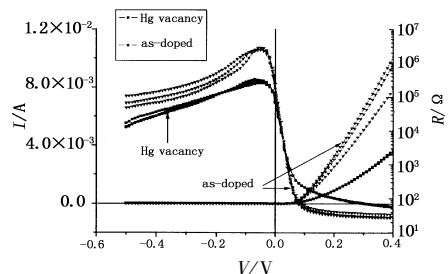


图 2 两种器件  $IV-RV$  性能比较

在测量黑体响应率和探测率时,为避免测量和器件单个光敏元的偶然误差,分别选取砷掺杂和汞空位器件的 5 个光敏元进行测试,测量其对应的  $R_0$ 、响应电流、噪声电流,再计算出优值  $R_0A$ 、电流响应率和黑体探测率进行比较。由图 3(a)~图 3(d) 分别为两个器件的零偏阻抗、电流响应率、噪声电流密度、黑体探测率的对比图。砷掺杂与汞空位长波器件性能各项参数平均值比较如表 1 所示。

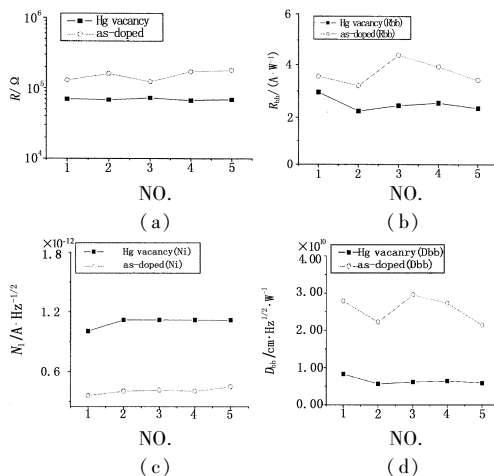


图 3 两个器件各性能参数比较(横坐标为对应光敏元编号)

从图 3 和表 1 可以清楚地看出:砷掺杂长波器件各项性能要优于汞空位长波器件,砷掺杂基区 n-on-p 长波碲镉汞器件的零偏阻抗可达到  $1.521 \times 10^5 \Omega$ , 优值  $R_0A$  大约为  $1.2 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 电流响应率为  $3.689 \text{ A/W}$ , 黑体探测率可达  $2.57 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ , 分别是汞空位基区 n-on-p 长波碲镉汞器件的各项参数的 1.5 ~ 4 倍, 尤其是黑体探测率差不多是汞空位器件的 4 倍; 另外砷掺杂长波器件的噪声电流密度也要比汞空位长波器件小, 大约为汞空位长波器件的 1/3。

表 1 砷掺杂与汞空位长波器件性能  
各项参数平均值比较

|     | $R_0/\Omega$                | $R_0A/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$ | 噪声电流/<br>( $\text{A} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ) | 电流响应<br>率/( $\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$ ) | 探测率/<br>( $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ) |
|-----|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 砷掺杂 | $1.521\text{E} \times 10^5$ | 1.1922                            | $4.05 \times 10^{-13}$                         | 3.689                                        | $2.57 \times 10^{10}$                                             |
| 汞空位 | $7.202 \times 10^4$         | 0.56122                           | $1.20 \times 10^{-12}$                         | 2.727                                        | $6.72 \times 10^9$                                                |

器件的响应光谱用 Thermo Nicolet NEXUS 670 型傅里叶红外光谱仪测量, 峰值 50% 的位置定义为器件的响应截止波长  $\lambda_c$ 。器件的光谱响应都覆盖很宽的频带, 器件的响应光谱范围可从短波一直延伸至长波, 在甚长波范围基本没有响应。该砷掺杂基区 n-on-p 碲镉汞长波器件 ( $x = 0.2312$ ) 在 77K 时的响应光谱如图 4 所示, 截止波长  $\lambda_c$  为  $9.66 \mu\text{m}$ 。

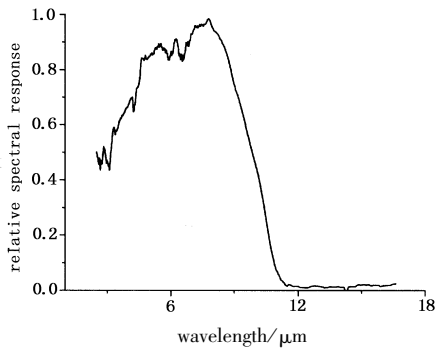


图 4 砷掺杂长波器件的响应光谱, 器件截止波长  $\lambda_c = 9.66 \mu\text{m}$

3.2 砷掺杂长波器件的变温特性

为了更准确地确定器件的暗电流机制, 利用制冷机测量了器件电流电压特性随温度的变化。扩散电流和产生复合电流是热电流机制, 与温度的倒数呈指数变化, 随着温度的降低电流下降显著<sup>[5-7]</sup>, 它们引起的零偏动态阻抗用  $(R_0)_{\text{thermal}}$  表示。图 5 是砷掺杂 n-on-p 平面结器件的  $R_0$  对数与温度的  $1000/T$  实验曲线及拟合结果。由图 5 实验曲线可知, 当温度较高时,  $R_0$  对数与  $1000/T$  基本上成线性变化, 但当温度小于一定值 75.5K 时,  $R_0$  随温度的降低变化

很小, 这显然不再与扩散和产生复合电流机理相吻合, 而应是受到了与温度关系不大的隧穿电流机制的影响。图 5 中两条拟合曲线的交叉温度点为 75.5K, 这说明在我们液氮温度测试环境下暗电流主要还是扩散电流和产生复合电流。

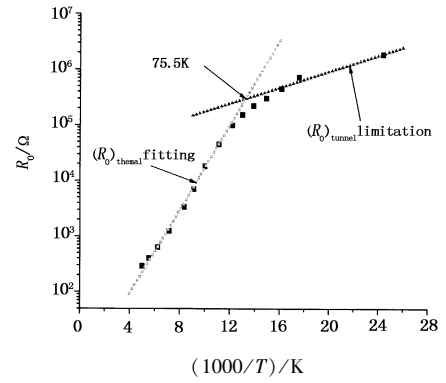


图 5 砷掺杂器件的零偏动态阻抗  $R_0$  与温度  $T$  的实验曲线和拟合结果

图 6 是砷掺杂 n-on-p 器件在  $T = 41 \text{ K}$ ,  $62 \text{ K}$ ,  $82 \text{ K}$  三个温度下的  $I - V$  特性和动态阻抗 - 电压特性 ( $R - V$ ) 曲线, 从图中可以看出, 在零偏压附近, 温度越高, 动态阻抗越小; 在大反向偏压下, 则是温度越高, 动态阻抗越大。随着温度升高, 动态阻抗的峰值位置向反向大偏压方向移动。这说明在液氮工作温度和零偏压附近, 暗电流依然主要受扩散电流和产生复合电流的影响; 只有在偏压小于  $-0.2 \text{ V}$  时, 直接带间隧穿电流和缺陷辅助隧穿电流才成为限制件动态阻抗的主要因素。

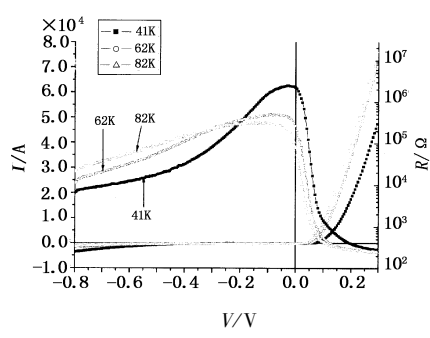


图 6 砷掺杂 n-on-p 平面结器件在  $T = 41 \text{ K}$ ,  $62 \text{ K}$  和  $82 \text{ K}$  时  $I - V$  和  $R - V$  特性曲线

4 结束语

本文通过对器件进行  $IV - RV$  的变温实验, 发现砷掺杂长波器件在液氮工作温度和零偏附近主要还是受扩散电流和产生复合电流的限制, 在偏压小于  $-0.2 \text{ V}$  时, 直接带间隧穿电流和缺陷辅助隧穿电流才成为限制件动态阻抗的主要因素。通过对组分接近的砷掺杂基区 n-on-p 平面结碲镉汞长波器件和

汞空位基区 n-on-p 平面结碲镉汞长波器件的各项性能进行对比分析,发现前者的各项性能均优于后者,说明汞空位作为缺陷中心对器件性能的影响很大,这也进一步说明了我们研究和制备砷掺杂基区 n-on-p 平面结碲镉汞长波器件是很有必要的,并且这种器件的各项性能还有继续提高的潜力,这就需要我们继续进一步研究。

**致 谢:**在本研究中,得到了杨建荣老师、林春老师、廖清君老师、王建新老师、魏彦锋老师、马伟平老师、叶振华老师、殷菲师姐、冯婧文等全室老师和同事的热心指导和帮助,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献:

[1] K D Mynbaev, V I Ivanov-Omskii. Doping of epitaxial layers and heterostructures based on HgCdTe[J]. Semiconductors, 2006, 40(1): 1-21.

[2] Cheung D T. An overview on defect studies in MCT[J]. J Vac. Sci. Technol, 1985, 3 (1): 128-130.

[3] Schaake H F, Tregilgas J H, Beck J D, et al. The effect of low temperature annealing on defects, impurities and electrical properties of (Hg, Cd) Te[J]. J. Vac. Sci. Technol. , 1985, 3(1): 143-149.

[4] Tregilgas J, Gnade B. Surface segregation of impurities induced by photon absorption in CdTe and (Hg, Cd) Te [J]. J. Vac. Sci. Technol. , 1985, 3(1): 156.

[5] 叶振华,等. 不同结构的碲镉汞长波光伏探测器的暗电流研究[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23 (2): 87-90.

[6] Rogalski A. Photovoltaic detector in infrared photon detectors[M]. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1996, 3.

[7] Kinch M A. Semiconductors and semimetals[M]. New York: Academic Press, 1981.

(上接第 509 页)

由该图可知,随着测量误差的增大,重建的温度分布与原分布的差异越来越大,但在 5% 的误差范围内,重建的总体效果是可以接受的,能基本满足工程应用的要求。

表 4 温度场模型参数表

| 截面尺寸  | 网格划分 | 椭圆中心       | 椭圆半径   | $T_0/^\circ\text{C}$ |
|-------|------|------------|--------|----------------------|
| 10×10 | 4×4  | (0.5, 0.5) | 15, 12 | 230                  |

表 5 模型参数重建结果

| 项目         | $a$  | $b$  | $x_0$ | $y_0$ | $T_0/^\circ\text{C}$ |
|------------|------|------|-------|-------|----------------------|
| 参数设定值      | 1.50 | 1.20 | 0.50  | 0.50  | 230.0                |
| 1% 测量误差水平  | 1.46 | 1.27 | 0.52  | 0.42  | 230.4                |
| 5% 测量误差水平  | 1.27 | 1.46 | 0.60  | 0.27  | 229.6                |
| 10% 测量误差水平 | 1.01 | 1.65 | 0.81  | 0.15  | 228.3                |

4 结 论

(1)提出了一种基于声学法的排气烟羽温度场测量方法,该方法可以根据需要在红外抑制监测区域边界布置若干声波传感器,利用各传播路径所需的时间,重建传播路径上的温度分布。相对于传统

的热电偶、点温仪等测温方法,可以更方便、更快捷地实现温度场的测量。

(2)通过仿真实例对基于声波法的排气烟羽温度场的重建效果进行了分析,结果表明在 5% 的测量误差水平以内,具有良好的重建效果,是一种有效地舰船排气烟羽温度场监测技术。

参考文献:

[1] 蒋耀庭,王跃. 红外隐身技术与发展[J]. 红外技术, 2005, 25(5): 7-9.

[2] 黄峰,汪岳峰,董伟,等. 基于灰度相关的红外隐身效果评价方法研究[J]. 光子学报, 2006, 35(6): 928-931.

[3] 栾大龙,刘勇. 红外隐身技术与反红外隐身技术[J]. 红外与激光技术, 1995, 24(3): 18-21.

[4] 陈翮,杨立. 海面舰艇红外隐身效能评估[J]. 激光与红外, 2006, 36(5): 335-337.

[5] Y Q Li, H C Zhou. Experiment study on acoustic vector tomography of 2-D flow field in an experiment-scale furnace[J]. Flow Meas. Instrum. , 2006, 17(5): 113-122.

[6] H Sielschott. Measurement of horizontal flow in a large scale furnace using acoustic vector tomography[J]. Flow Meas. Instrum. , 1997, 8(3/4): 191-197.