

文章编号:1001-9014(2009)01-0004-04

碲镉汞红外双色探测器响应光谱研究

叶振华, 周文洪, 胡伟达, 胡晓宁, 丁瑞军, 何力

(中国科学院上海技术物理研究所 材料器件中心, 上海 200083)

摘要:报道了集成碲镉汞红外双色焦平面探测芯片光谱特性研究的初步结果. 针对 HgCdTe 红外双色探测原型芯片短波响应光谱偏窄的现象, 展开了双色探测芯片光谱特性与结构特性内在关系的理论分析和实验研究, 发现了 SW 响应光谱窄的起因和解决思路, 并获得了优化结构的双色探测芯片正常的光谱响应曲线

关键词: HgCdTe; 双色焦平面; 光谱特性; 结构特性; 吸收系数

中图分类号: TN305.7; TN304.2⁺5 **文献标识码:** A

SPECTRAL STUDY ON RESPONSE OF HgCdTe IR TWO-COLOR DETECTOR ARRAYS

YE Zhen-Hua, ZHOU Wen-Hong, HU Wei-Da, HU Xiao-Ning, DING Rui-Jun, HE Li

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

Abstract: Some recent results of spectral characteristic study of integrated HgCdTe (mercury cadmium telluride) infrared two-color detector arrays were presented firstly. Many further investigations of spectral and structural characteristics were focused on SW (short wavelength) response of the preliminary two-color detection arrays which exhibited a narrow spectrum. The reason and solution of SW spectrum with small FWHM (full width of half maximum) were then found, and the proper spectrum of two-color detector with an improved structure was obtained. The results are as good as expected.

Key words: HgCdTe; two-color focal plane; spectral characteristic; structural characteristic; absorption coefficient

引言

红外焦平面探测器是一种集红外信息获取和信息处理于一体的先进的成像传感器,且第一代与第二代的红外焦平面器件已在空间、军事和国民经济等应用领域发挥了重要的作用^[1].近十年来,红外焦平面探测器又进入了一个高速发展时期,在国外已经出现了以高分辨率、多色化和智能化为显著特征的第三代红外焦平面^[1,2].作为新一代红外焦平面器件的突出代表,由响应两个不同波段的光电二极管在探测芯片纵向上叠加集成的碲镉汞(HgCdTe)红外双色焦平面探测器,具有高度集成、高可靠、超高速和小型化等特点,可将目标单一的探测(detection)功能扩展到对目标的认识(identification),进而最终实现对目标快速识别(discrimination)^[1-5].这种双波段纵向叠层的探测方式不仅为

准确地获取信息提供了新的自由度,极大地提高了目标的识别能力,而且还能大大降低应用系统的设计、尺寸、重量和成本.

几年前,我们基于原位(in-situ)掺杂和分子束外延(MBE)技术生长的 p-p-P-N 型 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 多层异质结材料,通过选择性区域的 B⁺注入、微台面阵列隔离、凹形表面钝化、爬坡金属化和混成互连等工艺,成功获得了我国第一个中波红外/短波红外(MWIR/SWIR)组合的集成 HgCdTe 红外双色原型探测芯片,并测到了其纵向上响应两个波段红外辐射的光电二极管的电流电压(I-V)特性曲线和光谱响应特性.但是,该红外双色探测芯片存在 SWIR 光电二极管的光谱响应谱半峰宽偏窄的现象^[6,7].

本文针对 HgCdTe 红外双色原型探测芯片短波(SW)响应光谱偏窄的不足,展开了双色探测芯片光谱特性与结构特性内在关系的理论计算和系列的

收稿日期:2008-08-16,修回日期:2008-12-18

Received date: 2008-08-16, revised date: 2008-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(6070612),红外物理国家重点实验室开放课题(200607)

作者简介:叶振华(1977-),男,江西玉山人,博士、副研,从事新一代红外焦平面探测器的关键技术研究.

实验研究.首先,从响应 SW 红外辐射的 HgCdTe 光电二极管的吸收系数出发,理论研究了 HgCdTe 红外双色原型探测芯片的 SW 光谱响应曲线偏窄的问题;其次,从实验上研究了同质结与异质结的单体台面阵列 SWIR 探测芯片的响应光谱;最后,结合理论和实验的结果,改进了 MWIR/SWIR 组合的集成 HgCdTe 红外双色探测芯片的器件结构,并获得优化结构的双色探测芯片光谱响应曲线.

1 原型双色探测芯片的光谱曲线

图 1 是响应光谱实验器件的背入射结构示意图.其中,图 1(a)是我们获得的 MWIR/SWIR 组合、 $N^+ - p - p - P - N$ 型集成 HgCdTe 红外双色原型探测芯片的结构实验图,如图所示,SW 红外辐射透过衬底首先在靠近衬底的第一个 P-N 光电二极管区域被吸收,MW 红外辐射透过 P-N 区域后在第二个 $N^+ - p$ 光电二极管区域被吸收.图 2 是集成 $N^+ - p - p - P - N$ 型 HgCdTe 红外双色原型探测芯片的两个波段光电二极管在液氮温度下的响应光谱曲线.光谱测量是采用傅里叶光谱仪 NEXUS 670,通过分别采集光路背景和含背景的器件响应,再仪器自动扣除背景来完成的.如图 2 所示,两个波段的光电二极管截止波长分别为 $3.04\mu m$ 和 $5.74\mu m$. SW 光电二极管的截止波长(cut-off wavelength)和 MW 光电二极管的起始响应波长(cut-on wavelength)基本相等,约为 $3.05\mu m$,表明 SW 光电二极管既能基本完全吸收并响应 SW 红外辐射,又起到了 MW 红外光谱过滤 SW 红外辐射的“窗口”作用.MW 光电二极管的响应光谱是正常的,但 SW 的响应光谱只是一个既窄又尖锐的峰^[6, 7].

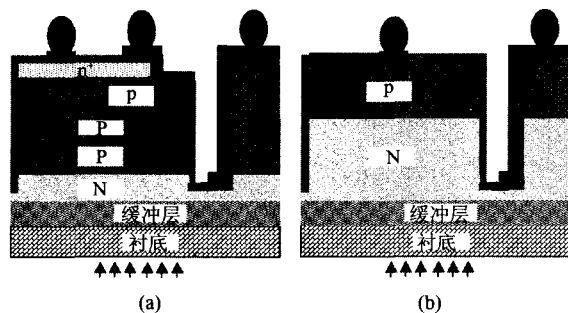


图 1 响应光谱研究的器件结构示意图(a) $N^+ - p - p - P - N$ 型双色探测器(b)P-on-N 异质结器件
Fig.1 Schematic drawing of infrared detector for spectral study (a) $N^+ - p - p - P - N$ two color detector (b)P-on-N hetero-structure detector

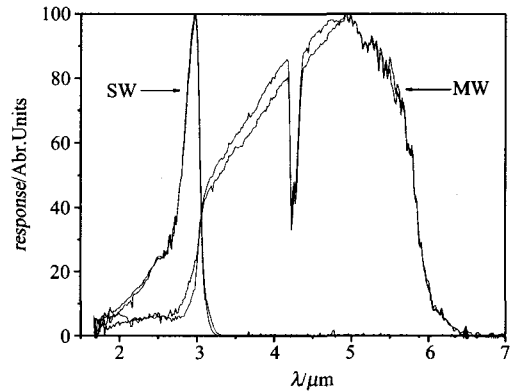


图 2 集成 HgCdTe 双色原型探测芯片的两个波段的响应光谱
Fig.2 Spectral response of preliminary integrated HgCdTe two-color detector

2 SW 光谱响应曲线偏窄的理论分析

在波长 λ 小于峰值波长 λ_{peak} 的 SW 范围内, HgCdTe 双色探测芯片的理想等功率光谱曲线应是通过零点的、斜率为 1 的直线.但如图 2 所示,集成 HgCdTe 双色原型探测芯片的 SWIR 响应光谱偏窄,实际上就是 SWIR 光谱曲线严重偏离了理想的响应曲线,反映了 SW 光电二极管在响应波长越短时红外辐射的量子效率越低,即量子效率在波长越短的方向上受到了越严重的制约.由于在扩散到 P-N 光电二极管的耗尽区附近后,SW 红外辐射的光生载流子受 P-N 台面结钝化质量和 p-n 结性能的影响是等几率的,因而它们只会影响器件的响应率,不会影响响应光谱偏移而出现较窄的响应曲线.所以,SWIR 响应光谱偏窄必然与不同波长的 SW 红外辐射的被吸收过程,以及其光生载流子在被 P-N 光电二极管分离前的扩散过程有关.

为此,先从 HgCdTe 材料吸收系数的理论计算出发,来分析不同波长的 SW 红外辐射在集成 HgCdTe 双色原型探测芯片的吸收情况,计算中采用文献常用的吸收系数公式^[8, 9].图 3 是理论计算的 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 材料的吸收系数倒数与波长的关系曲线($1/\alpha \sim \lambda$),材料组分与原型双色探测芯片 P-on-N 同质结的 SW 光电二极管相同,都为 $x = 0.4$.如图 3 所示,在波长 λ 小于该组分 HgCdTe 材料截止波长 $3.08\mu m$ 的范围内, $1/\alpha$ 都小于 $2\mu m$.所以,对于原型双色探测芯片 P-on-N 同质结的 SW 光电二极管而言,绝大部分 SW 红外辐射已在靠近 CdTe 缓冲层 $2\mu m$ 厚的 N 区表层范围内被吸收了,而不是在远离高复合速率的和低掺杂浓度的 P 区.

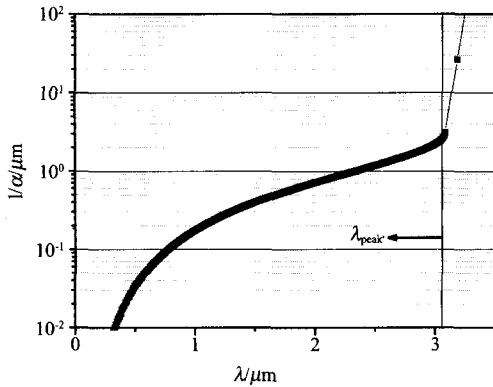


图3 组分 x 为 0.4 的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料的 $1/\alpha \sim \lambda$ 关系曲线
Fig.3 The $1/\alpha \sim \lambda$ characteristic of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ material with $x=0.4$

从图3还可看出,在 $\lambda \sim \lambda_{\text{peak}}$ 的 SW 红外辐射范围内,波长越短, $1/\alpha$ 就越小. 这表明波长越短的 SW 红外辐射,就越容易在靠近衬底的 N 区表层范围内被吸收. 由于 N 层与 CdTe 缓冲层之间的界面复合速率较大,导致光生载流子在 N 层与缓冲层界面处被复合的几率就越大. 又由于越在 N 区表层的光生载流子扩散到 P-N 耗尽区附近的距离就越远,以及重掺杂的 N 区少数载流子寿命比较短,从而导致波长越短的 SW 红外辐射光生载流子能扩散到 P-N 耗尽区附近的几率就越小.

由上述分析,可得到 HgCdTe 原型双色探测芯片 SWIR 响应光谱偏窄的原因是 SW 光电二极管同质 P-N 结的 N 区较厚,以及 N 区表层的界面复合速率大和高掺杂的 N 区的少数载流子寿命短. 但是,直接通过减小原型双色探测芯片 SW 光电二极管的 N 区厚度和降低掺杂浓度来解决 SWIR 响应光谱偏窄的问题是不可行的,这是因为 SW 光电二极管的 N 区是 HgCdTe 双色原型探测芯片的公共电极层,其探测芯片的工艺要求 N 层必须有较大的厚度,以及电学欧姆接触也必须要求 N 区重掺杂. 而通过优化 HgCdTe 双色多层异质材料的外延技术,来大幅度降低在异质衬底上外延的 N 层与缓冲层界面处的复合速率也是很困难的. 所以,基于双色原型探测芯片原有的结构设计,很难提高 SW 光电二极管的光谱响应半峰宽.

但是,上述分析也同样为解决 HgCdTe 双色探测芯片 SWIR 响应光谱偏窄的问题提供了思路,即通过改变集成双色探测芯片的 SW 光电二极管结构,使 SW 红外辐射透过高掺杂的 N 区后,入射到远离缓冲层界面和低掺杂的 P 区再被吸收. 具体的实现

表 1 实验器件和原型双色芯片 SW 光电二极管的详细比较

Table 1 Comparing the device investigated and SW photodiode of the preliminary two-color detector in detail

样品	结构	P 区			N 区		
		厚度(μm)	组分	$\text{Na}(\text{cm}^{-1})$	厚度(μm)	组分	$\text{Nd}(\text{cm}^{-1})$
实验器件	P-on-N 异质结台面	7.22	0.397	1.2×10^{16}	3.22	0.45	5×10^{17}
原型双色探测芯片 SW 器件	P-on-N 同质结台面	6	0.4	2.8×10^{15}	2	0.4	5×10^{17}

方法是 SW 光电二极管采用宽禁带的 N 区和响应 SW 红外辐射的 P 区组成的异质结,来代替原型双色探测芯片的 P-N 同质结.

3 异质结的台面器件光谱特性

图 1(b) 是异质结台面实验器件的结构示意图,如图所示,它与原型 HgCdTe 双色探测芯片 SWIR 光电二极管相似,都是由 MBE 技术原位生长的 P-on-N 材料经台面芯片加工而获得的深台面结器件. 表 1 是实验器件和双色器件 SW 二极管具体的材料、器件参数. 如表 1 所示,它们之间最大的区别在于实验的台面器件采用异质结,而双色器件的 SW 光电二极管是同质结的.

图 4 是异质结实验器件和原型双色器件 SW 光电二极管的响应光谱曲线. 如图 4 所示,虽然异质结实验器件的响应光谱在 $\lambda = 3.05$ 附近出现了“凹”形的大气吸收谷,但其响应光谱半峰宽明显比双色器件 SW 光电二极管的大很多. 如图所示,由于实验器件是 N 区组分 x 为 0.45 宽禁带和重掺杂的 P-on-N 异质结,所以波长小于 N 区截止波长 $2.57\mu\text{m}$ 的红外辐射绝大部分都在 N 区被吸收,导致该区域的光谱响应与原型双色器件 SW 一样也很小,而波长大于 $2.57\mu\text{m}$ 的红外辐射是在透过 N 区后于远离缓冲层界面和低掺杂的 P 区被吸收的,其响应明显增大. 该实验结果证实了 P-on-N 异质结的台面器件,即使 N 区是重掺杂,且厚度较大,也能获得半峰宽较大的响应光谱.

4 改进结构的双色探测芯片的光谱特性

结合原型双色探测芯片的 SW 响应光谱窄问题的理论分析和 P-on-N 异质结器件的实验结果,重新进行了 SW 光电二极管采用异质结构的双色焦平面探测器的研制. 图 5 是改进结构的双色探测芯片的

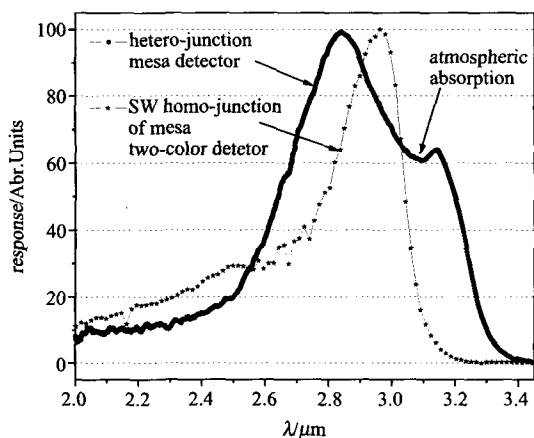


图4 异质结实验器件和原型双色芯片 SW 光电二极管的响应光谱曲线

Fig. 4 Spectral response of hetero-structure detector and SW photodiode of preliminary integrated HgCdTe two-color detector

响应光谱,如图所示,两个波段的光电二极管截止波长分别为 $2.70\mu\text{m}$ 和 $3.80\mu\text{m}$,双色焦平面探测器的 SWIR 光谱响应半峰宽明显增大。

由于改进结构的 HgCdTe 红外双色探测器 SW 光电二极管是 P-on-N 异质结构,其中双色探测芯片公共接触的重掺杂 N 区组分 x 为 0.545,材料截止波长为 $1.95\mu\text{m}$ 。如图 5 所示,当波长小于 $1.95\mu\text{m}$ 时,红外辐射因绝大部分都在 N 区被吸收而导致该区域的光谱响应也比较小,而波长大于 $1.95\mu\text{m}$ 时,红外辐射能透过 N 区后而到达远离缓冲层界面和低掺杂的 P 区被吸收,其相对响应光谱迅速增大。所以,双色探测芯片 P-on-N 异质结构的 SW 光电二极管响应光谱半峰宽比较大,且 N 区明显起到了过滤短波红外辐射的“窗口”作用。

5 结语

本文针对 HgCdTe 红外双色原型探测芯片 SW 响应光谱偏窄的不足,展开了深入的理论分析和实验研究。结果表明原型双色探测芯片 SWIR 响应光谱偏窄的原因是 P-on-N 同质结的 SW 光电二极管,因作为双色探测芯片公共接触,其 N 区需要较大的厚度和重掺杂,以及 N 区表层与衬底缓冲层之间的界面复合速率大,导致了 SW 光电二极管在响应 SW 红外辐射时,红外辐射的波长越短,量子效率就越低。

根据研究结果,改进结构的集成 HgCdTe 双色探测芯片 SW 光电二极管,采用了宽禁带重掺杂的 N 区和响应 SW 红外辐射的 P 区组成的异质结构,来取代原型探测芯片 SW 同质结。由于波长大于 N 区截止波长的红外辐射能透过 N 区后而到达远离

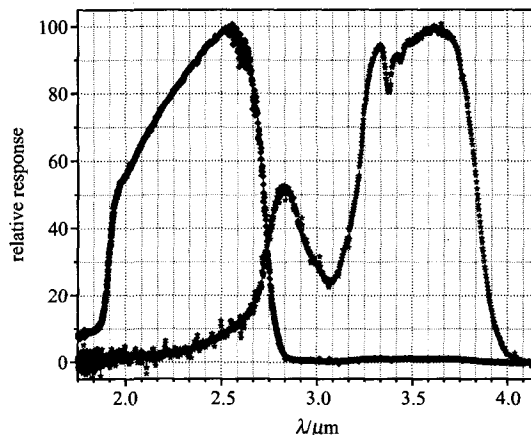


图5 改进结构后的双色焦平面探测器的正常响应光谱

Fig. 5 Normal spectral response of integrated HgCdTe two-color detector with an improved structure

缓冲层界面和低掺杂的 P 区被吸收,从而确保了改进结构的双色探测芯片两个波段都有正常的响应光谱特性,且 N 区明显起到了过滤短波红外辐射的“窗口”作用。

REFERENCES

- [1] Rogalski A. Infrared detectors; status and trends[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2004, **27**: 59—210.
- [2] Reago D A, Horn S B, Campbell J. Third generation imaging sensor system concepts[J]. *SPIE*, 1999, **3701**: 108—117.
- [3] Goldber A C, Fischer T, Derzko Z. Application of dual-band infrared focal plane arrays to tactical and strategic military problems[J]. *SPIE*, 2003, **4820**: 500—514.
- [4] QIAO Hui, ZHOU Wen-Hong, YE Zhen-Hua, et al. Study of hydrogenation on HgCdTe photovoltaic detectors[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (乔辉, 周文洪, 叶振华, 等. 碲镉汞光伏型探测器的氢化处理研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(5): 326—328.
- [5] XU Xiang-Yan, YE Zhen-Hua, LI Zhi-Feng, et al. Numerical modeling of middle wavelength two-color photovoltaic HgCdTe detectors[J]. *J. Infrared and Millim. Waves* (徐向晏, 叶振华, 李志锋, 等. 中波双色光伏型 HgCdTe 红外探测器模拟研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3): 164—169.
- [6] SHAO Jun, MA Li-Li, LÜ Xiang, et al. Recent progress and potential impact of modulation spectroscopy for narrow-gap HgCdTe[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (邵军, 马丽丽, 吕翔, 等. 窄禁带碲镉汞调制光谱的近期进展和前景. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(1): 1—6.
- [7] YE Zhen-Hua, WU Jun, HU Xiao-Ning, et al. A preliminary study on MBE grown HgCdTe two-color FPAs[J]. *SPIE*, 2004, **5640**: 66—73.
- [8] Chu J, Mi Z, Tang D. Band-to-band optical absorption in narrow-gap $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ semiconductors [j]. *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**: 3955—3961.
- [9] Chu Junhao, Li Biao, Liu Kun. et al. Empirical rule of intrinsic absorption spectroscopy in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(2): 1234—1235.