

热电制冷 HgCdTe 中波红外探测器的研制

苏玉辉, 冯江敏, 赵维艳, 龚晓霞, 马 启, 邓功荣, 余连杰

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 利用碲镉汞 (HgCdTe) 体晶材料, 采用 HgCdTe 材料拼接技术、磨抛技术等成熟的探测器芯片制备工艺以及三级热电制冷技术, 设计并研制出了热电制冷型 13 元 HgCdTe 中波红外光导探测器。在 -50°C 时, 峰值电压响应率可达 $2.7 \times 10^4 \text{ V/W}$, 峰值探测率达到 $2.3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 响应波段在 $3.0 \sim 4.6 \mu\text{m}$ 之间, 峰值响应波长为 $4.2 \mu\text{m}$ 。

关键词: 红外探测器; 碲镉汞; 热电制冷

中图分类号: TN304.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2017)08-0700-04

Thermoelectric-Cooled HgCdTe MWIR Detectors

SU Yuhui, FENG Jiangmin, ZHAO Weiyan, GONG Xiaoxia, MA Qi, DENG Gongrong, YU Lianjie

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: By using bulk HgCdTe crystal materials, the detector chip preparation process including HgCdTe material splicing and polishing technology, and three-stage thermoelectric refrigeration technology, a thermoelectric-refrigerator-type 13-pixel HgCdTe photoconductive mid-wavelength infrared detector is designed and manufactured. At a temperature of -50°C , the peak voltage response can reach $2.7 \times 10^4 \text{ V/W}$, the peak detection reaches $2.3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, and the response band is in the range of $3.0 \sim 4.6 \mu\text{m}$ with a peak response wavelength of $4.2 \mu\text{m}$.

Key words: infrared detectors, HgCdTe, thermoelectric cooled

0 引言

中波红外 ($3 \sim 5 \mu\text{m}$) 是重要的军用红外探测波段, 在红外热成像、红外制导等方面有独特优势。碲镉汞 (HgCdTe) 材料是重要的红外探测器材料之一, HgCdTe 红外探测器具有探测灵敏度高、响应速度快、响应波段范围可调等特点, 已广泛应用于红外成像、制导和航天遥感等军事和民用领域。中波 HgCdTe 红外探测器的工作温度较高 (可在 150 K 左右工作)^[1]。第一代碲镉汞红外探测器主要是多元光导型, 但是第一代碲镉汞光导探测器大都需要制冷到低温下工作。

热电制冷型红外探测器具有制冷速度快、工作温度高、响应速度快等特点。利用一级或多级热电制冷的高工作温度红外探测器兼顾了制冷型光子探测器和非制冷型热探测器的优点, 并且探测器的性能比非制冷型的热探测器要高, 响应速度快。近年来, 采用热电制冷的高工作温度红外探测器得到了飞速发展^[2-3]。2005 年前后, 国内制出热电制冷单元 HgCdTe 光导型红外探测器, 工作温度达到 250 K 以上, 主要应用于火

车热轴测温报警和油气管道监测等领域^[4]。2010 年, 国内对热电制冷中波红外探测器应用到末敏弹领域进行了研究, 热电制冷中波红外探测器在在两级制冷 230 K 的情况下, 响应时间和探测率上的性能都远优于单元热释电探测器^[5]。

本文利用 HgCdTe 体晶材料, 通过材料拼接和磨抛技术, 制备了 13 元 HgCdTe 中波光导探测器, 利用三级热电制冷器技术, 在 -50°C 时研究了探测器响应率、探测率和光谱响应范围, 探测器的性能可满足弹载应用。

1 实验

研制的热电制冷型 HgCdTe 红外探测器主要由多元光导型红外探测器芯片、热电制冷器、测温二极管、管座、管帽 (含红外窗片) 等组成, 其结构如图 1 所示。HgCdTe 探测器芯片光敏元数为 13 元, 探测器芯片粘接在热电制冷器的冷端面上, 然后一起粘接在管座上, 最后通过管帽封闭在密闭氮气空间内。芯片的各探测元、热电制冷器的正负电极通过管座的对应管

收稿日期: 2016-10-15; 修订日期: 2017-08-02.

作者简介: 苏玉辉 (1978-), 男, 云南宜良人, 高级工程师, 主要研究方向为红外探测器。E-mail: 46409201@qq.com.

脚引出。

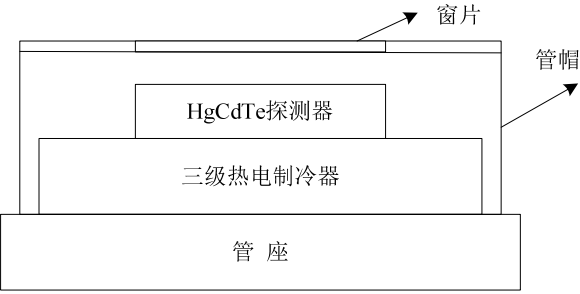


图 1 探测器封装结构示意图

Fig.1 The structure of a TE-cooled HgCdTe detectors

所设计的热电制冷型多元光导型 HgCdTe 红外探测器的探测元数为 13 元线列, 光敏元尺寸为 $\phi 300\text{ }\mu\text{m}$ 。采用 HgCdTe 体晶材料, 经过光刻、镀膜、刻蚀、成型等工艺, 制备出多元光导型 HgCdTe 红外探测器芯片。由于 13 元探测器芯片的总长度超过单片材料的长度, 因此要采用拼接方法, 把两片材料粘接在一起。其关键的技术是两片之间的间距应尽可能小, 材料的厚度差异小。

良好的材料表面是提高探测器性能的关键, 因此首先对材料表面处理, 包括研磨、抛光、腐蚀、清洗、表面钝化等。为了提高器件性能, 对于每一个单片材料, 在流通工艺前都要进行一系列的表面处理, 其中磨抛是最关键的一步。先对第一面进行研磨、抛光处理, 在高倍显微镜下观察无划痕、坑点等缺陷后, 对材料进行腐蚀, 清洗等处理。对表面钝化后的材料进行光刻, 然后刻蚀出所需的光敏面形状。最后采用铬金合金制备出探测器的电极。把探测器芯片封装到变温液氮杜瓦瓶进行中测筛选。用控温仪将温度控制到 -50°C , 采用 500 K 的标准黑体辐射测试器件信号。

封装时首先把三级热电制冷器粘接在管座上, 把电极引线焊接在管座接线柱上。然后把经过中测筛选合格的 HgCdTe 芯片粘接在三级热电致冷器的表面, 把探测器电极引线焊接在管座接线柱上。最后封装上带有宝石窗片的窗帽, 探测器密封。工作时, 利用管

座上对应的各个接柱, 分别给制冷器和探测器加工作偏压或偏流, 利用三级热电制冷器制冷到工作温度。为了提高制冷效率, 把封装后的探测器组件固定在金属散热块上。如图 2 所示。

热电制冷 (TEC) 是利用塞贝克效应进行制冷^[5-7]。当在 TEC 两端加直流工作电压时, 其正面制冷 (制冷), 背面发热 (热端)。利用导电胶把探测器粘接在冷端, 金属散热块固定在热端。通过调整 TEC 两端的电压值, 可控制其制冷温度, 使探测器稳定工作在所需要的温度 (如 -30°C 、 -50°C 等)。由于红外探测器的响应率与工作温度有关, 在一定的温度范围内, 探测器的工作温度越低, 其响应率越大^[8]。因此, TEC 制冷可以降低红外探测器的噪声, 提高其探测率和响应率。

设计并联系国内专业厂家制备三级热电制冷器, 用于 13 元线列热电制冷 HgCdTe 中波红外探测器, 其制冷温度可达 -50°C 。

2 结果与讨论

给制冷器通电 (最大工作电压 $\leq 8.6\text{ V}$, 最大工作电流 $\leq 1.5\text{ A}$), 待温度冷却到 -50°C 后, 给探测器加恒定偏流工作。在调制频率 $f=1000\text{ Hz}$, 外加偏置电流 $I_B=1\text{ mA}$ 的条件下, 标准黑体辐射源 $T_B=500\text{ K}$, 利用锁相放大器测量了热电制冷型多元光导型 HgCdTe 中波红外探测器的响应率和探测率。利用红外探测器光谱响应测试系统, 测量了探测器的相对光谱响应曲线。探测器的电阻、响应率和探测率等测试结果见表 1。

2.1 电压响应率

用图 3 所示的红外探测器测试系统测量了热电制冷型多元光导型 HgCdTe 中波红外探测器的响应率。打开光学调制器电源, 将调整频率设置为 $f=1000\text{ Hz}$, 利用锁相放大器测量探测器的黑体信号电压值 V_S , 探测器的黑体电压响应率 R_V 如式(1)所示^[6]:

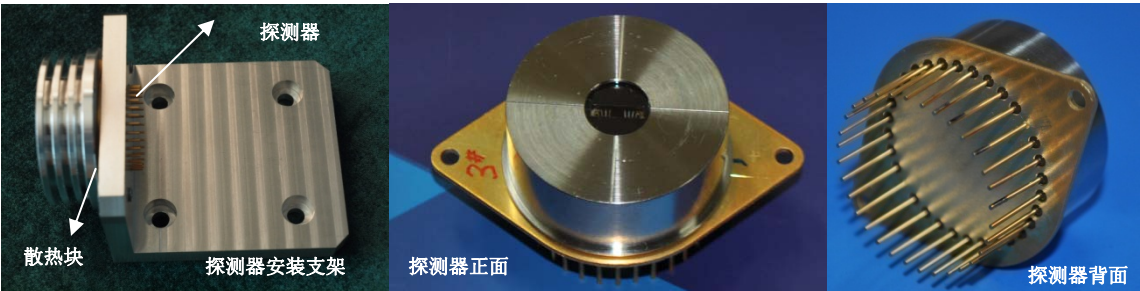


图 2 加装散热块的热电制冷 HgCdTe 红外探测器

Fig.2 TE-cooled HgCdTe MWIR detectors with a cooling block

表 1 HgCdTe 探测器性能参数测试表
Table 1 The performance parameters of a TE-cooled MWIR HgCdTe detector

探测元号	电阻/ Ω		$V_S/\mu V$	$V_N/\mu V$	$R_V/(V/W)$	$D_{bb}^*/(cmHz^{1/2}/W)$
	室温	-50℃				
1	298	365	19.6	0.030	2.2×10^4	1.8×10^{10}
2	250	332	19.0	0.025	2.1×10^4	2.1×10^{10}
3	229	315	16.0	0.025	1.8×10^4	1.8×10^{10}
4	224	315	16.3	0.027	1.8×10^4	1.7×10^{10}
5	276	362	19.2	0.026	2.1×10^4	2.1×10^{10}
6	261	343	16.7	0.028	1.8×10^4	1.7×10^{10}
7	247	328	18.6	0.030	2.1×10^4	1.7×10^{10}
8	227	321	15.2	0.030	1.7×10^4	1.4×10^{10}
9	203	300	14.7	0.025	1.6×10^4	1.6×10^{10}
10	239	353	24.7	0.030	2.7×10^4	2.3×10^{10}
11	248	342	18.5	0.032	2.0×10^4	1.6×10^{10}
12	280	368	19.0	0.032	2.1×10^4	1.6×10^{10}
13	377	366	22.4	0.041	2.5×10^4	1.5×10^{10}

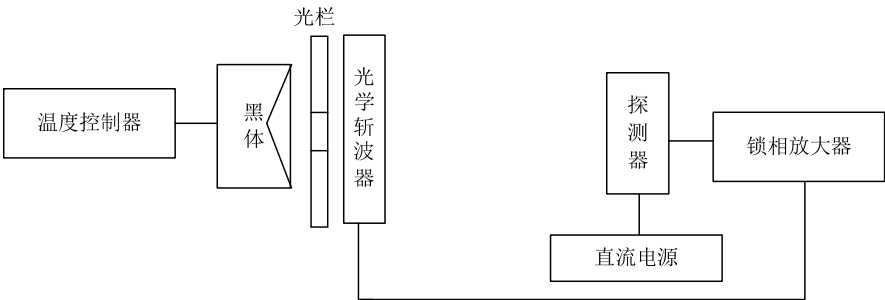


图 3 HgCdTe 红外探测器测试系统示意图
Fig.3 Schematic diagram of the test system for HgCdTe infrared detector

$$R_V = \frac{V_S}{EA_d} \tag{1}$$

$$D_p^* = \frac{R_V}{V_N} \sqrt{A_d \Delta f} \tag{2}$$

式中： E 为黑体辐照度， W/cm^2 ； V_S 为电压信号， V ； A_d 为光敏面标称面积， cm^2 。

式中： Δf 为带宽， Hz ； V_N 为噪声电压， V 。

在 -50℃，4.2 μm 峰值波长条件下，热电制冷型多元光导型 HgCdTe 中波红外探测器的平均峰值响应率为 $2.0\times 10^4 V/W$ ，最大达到 $2.7\times 10^4 V/W$ 。

热电制冷型多元光导型 HgCdTe 中波红外探测器的平均峰值探测率为 $1.8\times 10^{10} cmHz^{1/2}/W$ 。

2.2 探测率

2.3 光谱响应曲线

将器件盖上屏蔽罩，调节锁相放大器的参考频率到需要值，调节时间常数 τ_c ，通过计算得到其带宽 Δf 值（锁相放大器的带宽为 $\Delta f=1/(8\tau_c)$ ），由锁相放大器测量出 $f=1000 Hz$ 的噪声电压 V_N 。利用公式(2)计算出其探测率^[6]：

DSR100IR-B 红外探测器光谱响应测试系统的光源是硅碳棒，红外光源经调制后，入射到光栅上，再经过光栅分光后输出入射到探测器上。利用标定过的热释电探测器作为标准探测器，其光谱响应曲线和光谱响应率已知。打开 DSR100IR-B 红外探测器光谱响应测试系统的总电源开关后，开启红外光源冷却系统，然后再打开红外光源的电源开关，光源预热 30 min。

打开软件,进入测试软件操作界面,连接全部仪器设备。首先移入热释电探测器到光源出孔位置,并进行上下、左右和前后调节,使其信号最大,记下标准热释电探测器的位置。然后移开标准热释电探测器,把 HgCdTe 中波红外探测器移入到光源出孔位置,并进行上下、左右和前后调节,使其信号最大,记下待测探测器的位置。设定测量波长范围(3~5 μm)、采集步长和定标扫描模式后,利用软件控制锁相放大器自动采集标准探测器和待测探测器的响应光电流,完成光谱扫描,并进行数据处理。将待测探测器信号和标准探测器的标定数据对比,得到待测探测器的光谱响应度曲线。通过 DSR100IR-B 红外探测器光谱响应测试系统的控制软件自动计算出被测探测器的光谱响应,然后进行归一化处理得到热电制冷型多元光导型 HgCdTe 中波红外探测器的归一化光谱响应曲线,如图4所示。其响应波段范围在 3.0~4.6 μm (前后截止波长均按峰值响应的 50%计),峰值波长约 4.2 μm 。

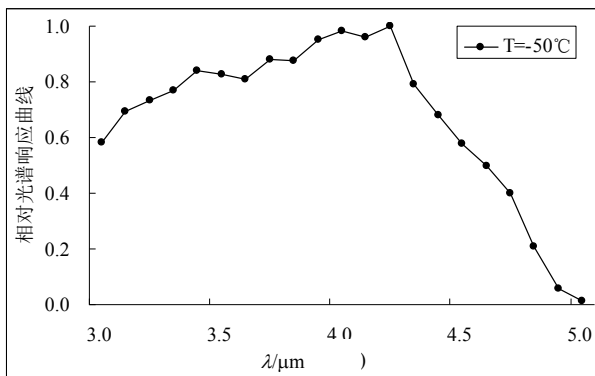


图4 热电制冷中波 HgCdTe 红外探测器的光谱响应曲线

Fig.4 The relative spectrum response of the TE-cooled HgCdTe MWIR detectors

由于利用单色仪测试探测器的光谱响应曲线时,设置每间隔 0.1 μm 的波长采集一个点,而且探测器的绝对信号较小(微伏量级),易受背景干扰的影响波动,引起其光谱响应信号波动,导致其光谱响应曲线出现抖动,但其测试误差不超过 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 。

3 结论

研制出三级热电制冷 13 元线列中波 HgCdTe 红外探测器,工作温度 -50℃ 时,测量了探测器的响应率、探测率和光谱响应曲线等参数。结果表明,13

元线列中波 HgCdTe 红外探测器的峰值电压响应率可达 $2.7 \times 10^4 \text{ V/W}$, 峰值探测率达到 $2.3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 响应波段范围在 3.0~4.6 μm 。

参考文献:

- [1] Lutz H, Breiter R, Figgemeier H, et al. Improved high operating temperature MCT MWIR modules[C]//Proc. of SPIE, 2014, **9070**: 90701D.
- [2] David B L, Philippe T, Frédéric P, et al. New IR detectors with small pixel pitch and high operating Temperature[C]//Proc. of SPIE, 2010, **7854**: 78540M.
- [3] Michel V, Laurent R, Fabien C, et al. HOT infrared detectors using MCT technology[C]//Proc. of SPIE, 2011, **8012**: 80122W.
- [4] 叶柏松, 刘飞, 袁永刚, 等. HgCdTe 轴温探测器噪声的温度特性研究[J]. 传感器与微系统, 2013, **32**(12): 49-54.
YE Baisong, LIU Fei, YUAN Yonggang, et al. Study on temperature characteristic of noise of HgCdTe shaft temperature detector[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, **32**(12): 49-54.
- [5] 罗来邦, 王述琪, 张力, 等. 热电制冷中波红外探测器在未敏弹上的应用[J]. 探测与控制学报, 2010, **32**(1): 35-38.
LUO Laibang, WANG Shuqi, ZHANG Li, et al. Application of TE-cooled medium wave IR detector to smart ammunition[J]. Journal of Detection & Control, 2010, **32**(1): 35-38.
- [6] 吴宗凡, 柳美琳, 张绍举, 等. 红外与微光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
WU Zongfan, LIU Meilin, ZHANG Shaoju, et al. Infrared and Micro Light Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.
- [7] 邢素霞. 非制冷红外热成像系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
XING Suxia. Research on Uncooled Infrared Thermal Imaging System[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.
- [8] 冯国斌, 张检民, 杨鹏翎, 等. 室温中红外 HgCdTe 光导探测器响应率的温度特性[J]. 光子学报, 2013, **42**(7): 787-791.
FENG Guobin, ZHANG Jianmin, YANG Pengling, et al. Responsivity variation with temperature of uncooled mid-infrared HgCdTe photoconductive detector[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, **42**(7): 787-791.