

温差电致冷光伏型 HgCdTe 探测器 组件的研制

冯志超 胡 渝 华为实

(成都电讯工程学院应用物理所)

摘要——已研制成用六级半导体致冷器致冷的 $10.6\ \mu\text{m}$ 光伏型 HgCdTe 探测器组件, 组件的黑体探测率 $D^*(500, 1000, 1)$ 可达 $3 \times 10^7\ \text{cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。将组件用于 $10.6\ \mu\text{m}$ CO_2 激光大气通信机, 进行通信实验, 取得了较好的结果。

一、前 言

$10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光器已在激光通信、激光测距及激光雷达等系统中广泛采用。这些系统均需要宽带、高灵敏度的探测器。工作温度 77 K 的 HgCdTe 探测器在 $10.6\ \mu\text{m}$ 波长上有很高的探测率和很宽的频带, 但它需要液氮致冷, 使用甚为不便, 这就限制了它的推广应用。因此, 提高 HgCdTe 探测器的工作温度引起了国内外的极大重视^[1,2]。1976 年汤定元^[3]在理论上分析了工作于近室温的光导 HgCdTe 器件的探测率 D^* , 论证了 HgCdTe 器件提高工作温度的可能性。1981 年我院与昆明物理所配合, 对于干冰致冷工作于 -80°C 的光伏 HgCdTe 器件作了探讨, 得到 D^* 可达 $10^7\ \text{cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 的实验结果^[4]。最近, 我们利用六级半导体致冷器致冷, 作出了封离式光伏 HgCdTe 探测器组件, 组件的探测率 D^* 及截止波长 λ_c 都较干冰温度下的结果为佳。我们将该组件用于 $10.6\ \mu\text{m}$ CO_2 激光大气通信系统上, 获得了较好的结果。

二、组件的结构和绝热

图 1、图 2 分别为组件的实物照片和结构示意图。

本组件为玻璃结构的杜瓦瓶, 采用六级半导体致冷器致冷。据报道^[5], 要在六级半导体致冷器冷端获得低于 -80°C 的温度, 一般应有 10^{-5} 至 10^{-6} Torr 的真空度。但是 HgCdTe 器件不能经受 100°C 以上的烘烤, 六级半导体致冷器又是由较大体积 ($42 \times 42 \times 52\ \text{mm}^3$) 的碲化铋、氧化铍陶瓷等材料组成, 制作时用了熔点 90°C 左右的焊料, 也不能在抽真空时高温烘烤去气。这样, 组件排气封离后其真空度往往只有 10^{-1} Torr, 甚至更低, 不能达到致冷

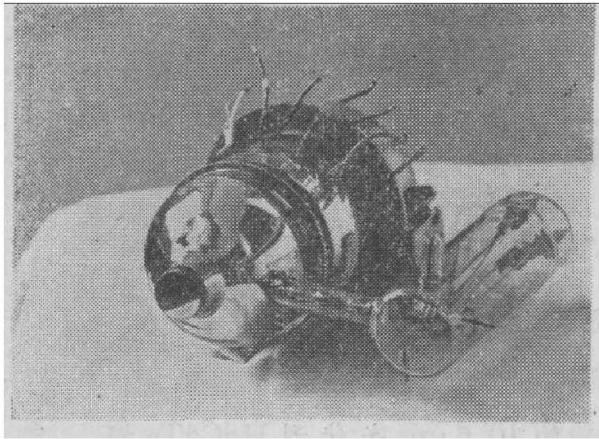


图1 组件实物

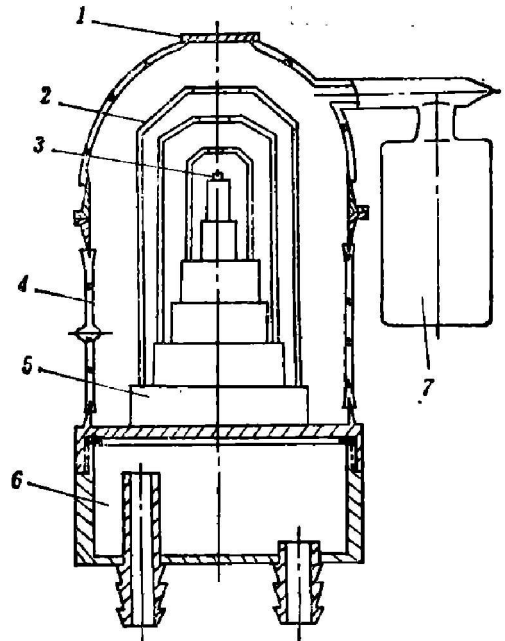


图2 组件结构示意图

- 1—红外窗口；2—冷屏 3—HgCdTe 元件；
4—玻璃杜瓦瓶；5—半导体致冷器；6—冷却水箱；7—钛升华泵

指标。我们采用钛升华泵吸气的方法，成功地克服了这一困难，作成了封离式温差电致冷 HgCdTe 组件。使用时对钛泵通电升华 2 分钟，组件的真空气度即可达 10^{-5} Torr 以上，使组件的致冷温度达 $-90^{\circ}\text{C} \sim -96^{\circ}\text{C}$ 。目前我们的组件每次升华后可正常工作 10 天，随着升华次数的增加，每次升华后的工作时间还会延长。组件如果存放数月不用，仍可启动钛泵恢复高真空度。根据我们制作的钛升华泵的寿命推算，组件可以在致冷器所需正常真空度的情况下，连续使用一万小时以上，之后可以更换新的钛泵继续使用。

为了获得更低的致冷温度，除了上述的真空绝热措施外，我们还采用在六级半导体致冷器上加冷屏的方式，来减少外界对致冷器的辐射漏热和残余气体分子的热传导漏热。实验中我们测得装有三级冷屏的六级半导体致冷器，其冷端温度较不装冷屏时要低 $10 \sim 13^{\circ}\text{C}$ ，如图 3 所示。此外，我们还在玻璃杜瓦瓶内壁镀了铝反射膜，以减少外界对致冷器的热辐射；连接杜瓦瓶壁和致冷器冷端的导线也尽量选用直径较小的，以减少热传导漏热。

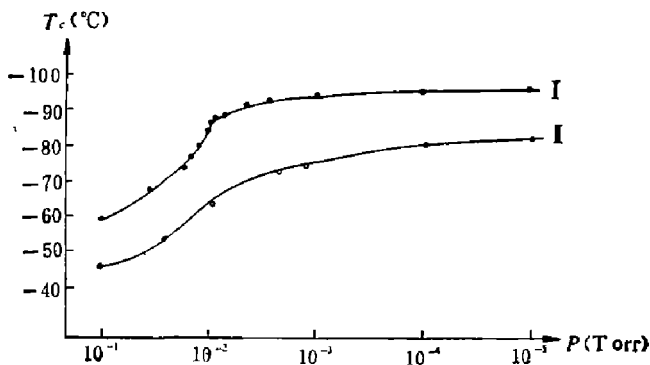


图3 冷端温度和真空度的关系
(1号组件)

I—三级冷屏，电流 4.8 A，冷却水温 22°C ；
II—无冷屏，电流 4.8 A，冷却水温 18°C

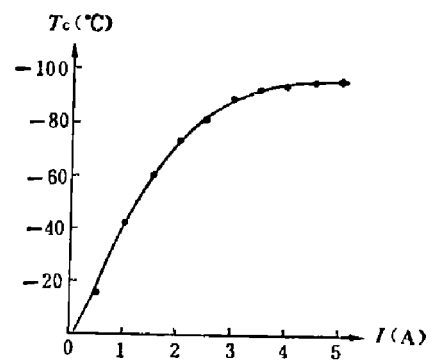


图4 致冷器电流和冷端温度的关系
(1号组件)

(真空度 10^{-4} Torr，冷却水温 13°C)

图4是致冷器电流 I 和冷端温度 T_c 的关系曲线。温度的测量由装在致冷器冷端的铜-康铜温差电偶完成。

我们制作的组件在致冷性能方面的指标为(以第三号组件为例): 工作电流 $I=4\text{ A}$, 输入功率 $N=30\text{ W}$, 真空度 $P=10^{-4}\sim 5\times 10^{-6}\text{ Torr}$, 冷却水温 $T=30^\circ\text{C}$, 冷端温度 $T_c=-92^\circ\text{C}$, 制冷量 $Q=15\text{ mW}$ 。

组件制成后, 我们曾在昆明和成都两地多次试验, 在湿度达 90% 以上的潮湿天气中使用, 也未观察到杜瓦瓶壁和红外窗口有结霜或蒙上水汽的现象。使用方便可靠。

三、组件的性能及测试

制作组件的光伏 HgCdTe 探测器是从组分 $x=0.2$ 的低温碲镉汞器件中挑选出来的, 光伏型 HgCdTe 探测器在出现背景辐射情形下的光谱探测率可按下式计算^[6]:

$$D_{\lambda}^* = \frac{\eta(r_s)\lambda\tau_n^{1/2}}{2hc_0L_n^{1/2}n_p^{1/2}\left[1+\frac{n_b}{2n_p}\right]^{1/2}}, \quad (1)$$

式中 $\eta(r_s)$ 是器件的量子效率; λ 是入射光波长; τ_n 是 p 区电子的寿命; h 是普朗克常数; c_0 是真空中光速; L_n 是 p 区少子(电子)的扩散长度; n_p 是 p 区少子(电子)的热平衡浓度; n_b 是由背景辐射所维持的稳定态非平衡电子-空穴对浓度。

按现有参数条件, 由式(1)计算, 当晶体组份 $x=0.2$, 工作温度 $T=77\text{ K}$ 时, 探测率 $D_{10.6\mu\text{m}}^*$ 约为 $10^{11}\text{ cm Hz}^{1/2}\text{ W}^{-1}$ 数量级。在 p 区掺杂浓度 $N_A=3\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$, 晶体组份 $x=0.2$, 量子效率 $\eta(r_s)=0.2$, 工作温度 $T=193\text{ K}$ 条件下, $D_{10.6\mu\text{m}}^*$ 可达 $10^9\text{ cm Hz}^{1/2}\text{ W}^{-1}$ ^[4]。就是说, 工作温度由 77 K 提高到 193 K 时, HgCdTe 器件的探测率理论上将下降约二个数量级。

我们将制得的组件进行了测试, 其结果见表 1。

表 1 HgCdTe 器件的性能

组件号	测试条件	λ_p (μm)	λ_c (μm)	$D^*(500, 1000, 1)$ ($\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$)	$D_{\lambda_p}^*$ ($\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$)	$D_{\lambda=10.6\mu\text{m}}^*$ ($\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$)	R_v (V/W)	η (%)	A (mm^2)
1	液氮测试	11	12	4.7×10^9	1×10^{10}	9×10^9		58	0.1
	干冰测试	8.4	9.2	1.4×10^7	3.6×10^7	1.1×10^7		1.6	0.1
	组件测试	8.8	9.5	3.1×10^7	9.7×10^7	1.6×10^7	0.6	1.6	0.1
2	液氮测试	11.5	11.7	7×10^9	1.9×10^{10}			27	0.12
	干冰测试	8.4	9.6	1.6×10^7	4.4×10^7	6.5×10^6		1.4	0.12
	组件测试	9.2	10	2.7×10^7	7.4×10^7	1.8×10^7	0.34	2.8	0.12
3a	液氮测试	11.2	12	5.6×10^9	1.6×10^{10}			60	0.12
	干冰测试	8.8	9.6	1.8×10^7	4.4×10^7	5×10^6		1.5	0.12
	组件测试	9.2	10.1	2.8×10^7	7.7×10^7	2.1×10^7	0.32	1.7	0.12
3b	组件测试	8.4	9.2	1.8×10^7	5.9×10^7	0.6×10^6	0.07	2.6	0.76

1) 组件测试的致冷温度为 $-90\sim -96^\circ\text{C}$; 2) 3号组件内装有 2个 HgCdTe 器件; 3) 干冰温度下测试光谱响应曲线时, 其通光狭缝宽度为液氮和组件测试时的 2倍。

测试结果表明:

1. 由于组件的工作温度比干冰致冷时低 $10\sim 16^\circ\text{C}$, 故测得的探测率 $D_{10.6\mu\text{m}}^*$ 及截止波长 λ_c 都有所增加。

2. 组件由于工作温度较之液氮温度提高 100 K 左右, 实际测试探测率 $D_{\lambda_p}^*$ 下降了约两个数量级。这个结果和理论分析大体上是符合的。组份 $x=0.2$ 的光伏 HgCdTe 探测器, 其工作温度由 77 K 提高到干冰温度后, 一方面峰值探测率 $D_{\lambda_p}^*$ 要下降, 另一方面 λ_p 和 λ_c 要向短波方向移动(实测平均值为 $2\mu\text{m}$), 因而在波长 $\lambda=10.6\mu\text{m}$ 时的工作点已位于光谱响应曲线的尾部了, 如图 5 所示。我们认为若改变器件的组份 $x^{[3]}$, 使 193 K 的光谱响应曲线峰值仍保持在 $10.6\mu\text{m}$ 左右, 则 $D_{10.6\mu\text{m}}^*$ 的下降将有所改善, 估计达到 $10^8\text{ cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 是可能的。

图 6 是第 3 号组件探测器的伏安特性曲线。曲线表明, 由于工作温度的提高, 器件的反向饱和电流急剧增加, 导致器件的 $p-n$ 结特性变坏, 零偏压电阻大大降低, 器件的探测率也因而降低。

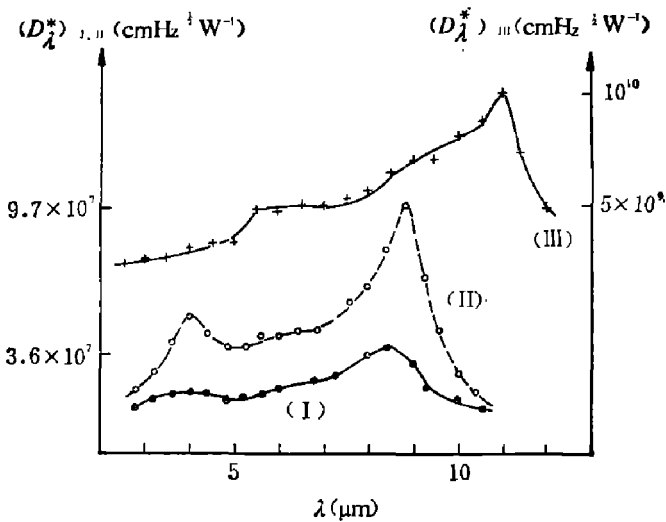


图 5 1号组件的光谱响应曲线

I—干冰温度; II—组件测试温度 (-96°C); III—液氮温度

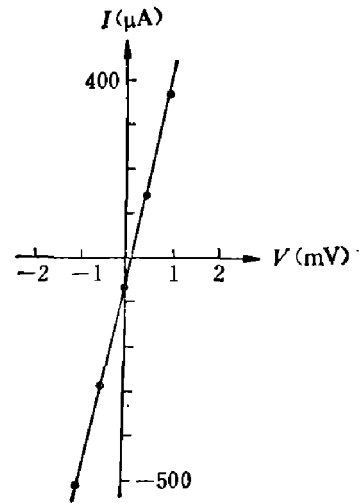


图 6 探测器的伏安特性

(3号组件, 冷端温度 -92°C)

我们利用 3 号组件在 $10.6\mu\text{m}$ CO_2 激光系统上作了室内测试, 测试数据见表 2。

表 2 $10.6\mu\text{m}$ CO_2 激光系统测试结果

器件光敏面面积 $S_d(\text{mm}^2)$	激光源高斯光束半径 $r(\text{mm})$	光敏面上的辐照功 率有效值 $P_i(\mu\text{W})$	前置放大器输出电 压有效值 $U_s(\text{mV})$	探测器输出信号电压 有效值 $E_s(\mu\text{V})$
0.12	30.5	40.6	14.3	9.5

由上述数据可以得到组件在 $10.6\mu\text{m}$ 光源下的电压响应率 $R_v=0.23\text{ V/W}$ 。在测试放大器输入端噪声 $E_n=1.1\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 放大器带宽 $\Delta f=16\text{ kHz}$ 时, 可得到 3 号组件的 $D_{10.6\mu\text{m}}^*$ 和噪声等效功率 NEP : $D_{10.6\mu\text{m}}^*=7\times 10^6\text{ cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, $NEP=4.8\times 10^{-9}\text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。对于 1 号组件我们得到其 $D_{10.6\mu\text{m}}^*=1.7\times 10^7\text{ cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, $NEP=1.8\times 10^{-9}\text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

这里要指出的是, 在我们的 CO_2 激光系统上, 测试用放大器的噪声还大于 HgCdTe 器件的噪声, 降低放大器的噪声还大有潜力, 使 NEP 再下降一个量级是可能的。

四、组件在 $10.6 \mu\text{mCO}_2$ 激光大气通信系统上的应用

我们用3号组件在直接探测的 $10.6 \mu\text{m CO}_2$ 激光大气通信三路机上进行了通信实验。系统采用卡塞格伦天线接收,并经锗透镜聚焦,组件置于接收天线尾部的调整架上,光路见图7。

实验结果:在通信距离 $L=5 \text{ km}$, 双方能见度为 $0.5 \sim 1 \text{ km}$ 的雾天情况下, 终端可得到信噪比 $S/N=52 \text{ dB}$, 利用三路载波机通话, 话音清晰, 失真度小, 效果良好。要指出的是, 由于所用的调整架不太合适, 我们未能收到最大光信号, 若调整架改进后, 终端信噪比还可提高。

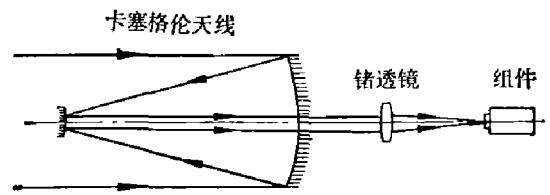


图7 接收光路图

五、结 论

1. 温差电致冷光伏 HgCdTe 探测器组件用于 $10.6 \mu\text{m}$ 波段探测时, 具有频带宽、灵敏度高(相对于热释电探测器)、低阻等特点, 在抵抗大气湍流的影响上显然优于 TGS 及 LiTaO_3 探测器^[7], 因此把它用于 $10.6 \mu\text{m}$ 的宽带大容量 CO_2 激光系统是可行的。表3表示温差电致冷光伏 HgCdTe 探测器组件和 TGS、 LiTaO_3 探测器在各种频率下的性能比较。

表3 几种探测器的性能与频率的关系

器 件		TGS(有衬底)	LiTaO_3 (有衬底)	温差电致冷光伏碲镉汞组件
性 能				
$D_{10.6 \mu\text{m}}^*$ ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$)	10 Hz	10^8	$<10^3$	10^7
	10 kHz	10^5	$<10^5$	10^7
	1 MHz	10^3	$<10^3$	10^7
R_v (V/W)	10 Hz	10^3	8×10^2	0.6
	10 kHz	1	0.8	0.6
	1 MHz	0.01	0.008	0.6
NEP ($\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$)	10 Hz			1.8×10^{-9}
	10 kHz	10^{-8}	$<10^{-8}$	1.8×10^{-9}
	1 MHz	10^{-6}	$<10^{-6}$	1.8×10^{-9}

2. 利用钛升华泵吸气和致冷器上加冷屏的方法, 较好地解决了组件的真空与绝热问题, 结构简单, 使用方便可靠。

3. 组件应用于 $10.6 \mu\text{m CO}_2$ 激光系统时, 还应当进一步降低放大器噪声以提高信噪比, 我们认为这是可能的。

4. 目前我们制作组件的光伏 HgCdTe 器件是按液氮条件研制的, 它在干冰温度下的性能还不理想, 进一步开展近室温 HgCdTe 器件的研制工作是十分重要的, 它将为温差电

致冷 HgCdTe 探测器组件的应用带来广阔的前景。

致谢——本组件的研制工作是在昆明物理所完成的，蒙昌鉴、李鸿勋同志给予了帮助和指导，成都电讯工程学院卢国伟同志协助进行了通信实验。本文写作过程中曾得到裘明信教授、乐时晓高级工程师的热心指导，在此向他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Koehler, T. AD-A032851, 1976.
- [2] Galus W., Persak T. and Piotrowski J., *Infrared Phys.*, **19**(1979), 649.
- [3] 汤定元, 红外物理与技术, (1976)4-5:
- [4] 叶玉堂, 红外技术, (1982), 1:
- [5] Wurtz, H. P., *Proc. SPIE*, **246** (1980), 15~21
- [6] 威拉德森 R. K., 比尔, A. C. 红外探测器, 国防工业出版社 1973.
- [7] 裘明信, 胡 渝, 成都电讯工程学院学报, (1979), 2-3:

DEVELOPMENT OF THE MODULES OF THE PHOTOVOLTAIC HgCdTe DETECTORS WITH THERMOELECTRIC COOLER

FENG ZHICAO, HU YU, HUA WEISHI
(Chengdu Institute of Radio Engineering)

ABSTRACT

In this paper the development of the modules of the photovoltaic HgCdTe detectors with six-stage thermoelectric cooler is reported. The detectivity, D^* (500, 1000, 1), of the modules is 3×10^7 cm Hz^{1/2}W⁻¹. Experiments with the modules for 10.6μm CO₂ laser communication are successful.