

长波大面积 HgCdTe 光导红外探测器的研究

王子孟 方家熊 司承才 胡亚春 马家骊

(中国科学院上海技术物理研究所传感技术联合开放国家实验室, 上海, 200083)

摘要: 研制的长波大面积 HgCdTe 光导红外探测器的面积为 $2.1 \times 2.1 \text{ mm}^2$, 在 80 K 时探测率 $D_p^* = 1.86 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 响应率 $R_p = 386 \text{ VW}^{-1}$, 长波限 $\lambda_{co} (50\%) > 18 \mu\text{m}$. 还研制了带有低温聚光器组合件结构的新型探测器, $D_p^* = 7.3 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, $\lambda_{co} (50\%) > 16 \mu\text{m}$.

关键词: 长波, 大面积, HgCdTe 探测器, 异形结构, 聚光器.

1 器件的设计

1.1 探测器特性的理论分析和计算

1.1.1 禁带宽度与组份、温度的关系

Hg_{1-x}Cd_xTe 晶体的禁带宽度 E_g 是组份 x 和温度 T 的函数, 可用经验公式^[1]表示为

$$E_g = -0.259 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2)(10^{-4})T + 0.35x^4, \quad (1)$$

式(1)中 x 、 T 适用范围为 $0 \leq x \leq 0.37 (+1)$, $4.2 \leq T \leq 300 \text{ K}$. 由式(1)可求得不同组份材料的禁带宽度与温度关系. 利用 $\lambda_c = 1.24/E_g$ 可求出长波限 λ_c 与温度关系(见图1).

如果 $x = 0.183$, 探测器工作在 105 K 与 77 K 时, 则 λ_c 分别为 $16.1 \mu\text{m}$ 与 $18.2 \mu\text{m}$.

1.1.2 载流子浓度

确定材料组份 x 后, 可根据本征载流子浓度 n_i 的经验公式^[2]

$$n_i = \left(1 + \frac{3.25kT}{E_g}\right) 9.56(10^{14}) E_g^{3/2} T^{3/2} \left[1 + 1.9 E_g^{3/4} \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right)\right]^{-1}, \quad (2)$$

由式(2)求得 n_i 与温度 T 的关系. 式(2)适用于 $x = 0.17 \sim 0.37$, $T \leq 300 \text{ K}$; 式(2)中 E_g 由式(1)给出. 在 $x = 0.19 \sim 0.29$, $T = 77 \sim 300 \text{ K}$ 时, 式(2)的计算结果与已有的实验数据符合得很好.

1.1.3 载流子寿命

经研究表明, 在质量较好的 HgCdTe 材料中, 载流子寿命基本上是本征的碰撞复合

寿命可用基于抛物型能带的 Beattie 公式表示为^[3]

$$\tau_i = 3.46 \times 10^{-13} \times \frac{1}{kT} \left(\frac{E_g}{kT} \right)^{1/2} \exp\left(\frac{E_g}{kT}\right). \quad (3)$$

在非本征条件下的 N 型材料, 其碰撞复合寿命可表示为

$$\tau_A = \frac{4n_i^2 \tau_i}{(n_0 + 4n_i)^{1/2} [n_0 + (n_0 + 4n_i)^{1/2}]}, \quad (4)$$

碰撞复合寿命与温度、组份关系见图 2: 由图 2 可知, 载流子寿命在高温时受组份影响较小, 而在低温时随组份 x 的降低迅速下降.

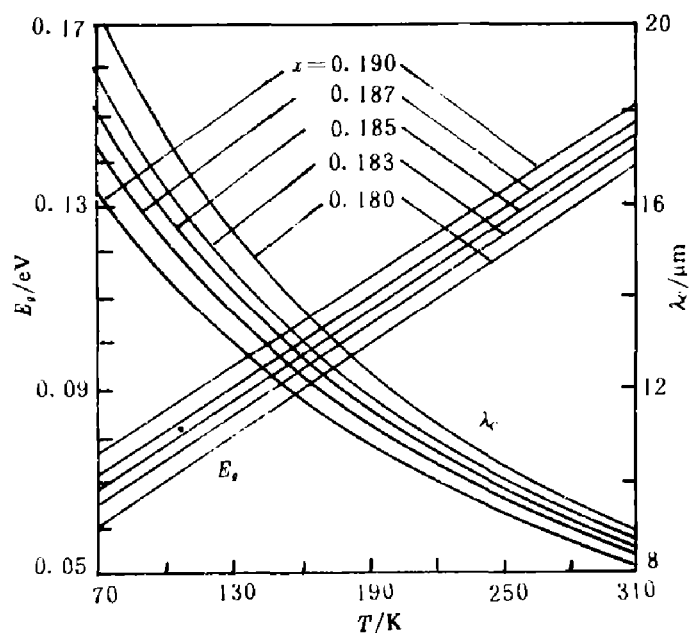


图 1 HgCdTe 的禁带宽度 E_g , 长波限 λ_c 与温度 T 的关系

Fig. 1 Energy gap and absorption cut-off wavelength of HgCdTe as a function of temperature

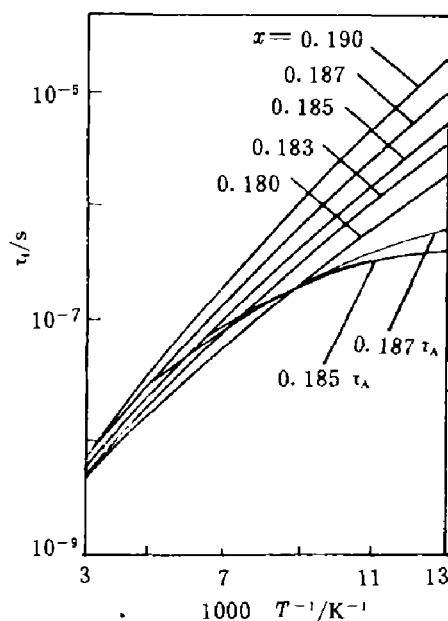


图 2 碰撞复合寿命与温度及组份关系

Fig. 2 The dependence of impact recombination lifetime on temperature and composition

载流子除在体内复合外, 还可以在表面上复合, 所以载流子寿命是这两种复合的综合. 其载流子的有效寿命 τ' 可表示为:

$$\tau' = \tau_A \frac{\sinh\left(\frac{d}{L}\right) + \frac{S\tau_A}{L} \left[\cosh\left(\frac{d}{L}\right) - 1 \right]}{\left(1 + \frac{S^2\tau_A^2}{L^2}\right) \sinh\left(\frac{d}{L}\right) + \frac{2S\tau_A}{L} \cosh\left(\frac{d}{L}\right)}, \quad (5)$$

式 (5) 中 S 为表面复合速度, d 为样品的厚度, L 为载流子扩散长度, $L = \left(\frac{hT\mu\tau_A}{q}\right)^{1/2}$

对于完整性较好的 HgCdTe 晶体, 在 $x = 0.186$, 77 K 时 $\tau_A = 0.6 \mu\text{s}$, 空穴的扩散长度约为 $30 \mu\text{m}$. 由式 (5) 可求得芯片厚度 d 不同时, 表面复合速度对 τ_A 的影响. 计算表明, 随着 x 的变小, 材料的空穴扩散长度略为减小. 本文中芯片厚度为 $20 \sim 30 \mu\text{m}$, 当表面复合

速度 $S = 900 \text{ cm/s}$, $\tau_A = 0.6 \mu\text{s}$ 时, τ' 约为 $0.65\tau_A$, 因此表面复合速度是影响探测器性能的重要因素之一. 表面复合的存在可缩短探测器的时间常数, 降低探测率.

1.1.4 响应率和探测率的计算

假定 $V_0 = 1.4 \text{ V}$, $\eta = 0.3$, $d = 25 \mu\text{m}$, $A_d = 2.1 \times 2.1 \text{ mm}^2$. 在 77 K 时, $n_0 = 4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $\tau = 0.6 \mu\text{s}$, 由非本征条件下, 电压响应率 (R_p) 和探测率 (D_p^*) 公式:

$$R_p = \frac{\eta \lambda V_0 \tau_A}{h C n_0 l_w d}, \quad D_p^* = \frac{\eta \lambda}{2 h C} \left[\frac{2 \tau_A}{n_0 d} \right]^{1/2}$$

可求得 $R_p = 502 \text{ V/W}$, $D_p^* = 1.44 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$. 若考虑表面复合的影响, 设 $S = 900 \text{ cm/s}$, 由式 (5) 可求得 $\tau' = 0.39 \mu\text{s}$, 得到 $R_p = 326 \text{ V/W}$, $D_p^* = 1.14 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$. 在 105 K 时, $n_0 = 1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $\tau = 0.28 \mu\text{s}$, 同理可求得 $R_p = 37 \text{ V/W}$, $D_p^* = 4.56 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$. 若考虑表面复合的影响, 可得到 $R_p = 25 \text{ V/W}$, $D_p^* = 3.76 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$.

图 3 表示 $x = 0.185$ 时探测率与温度的关系. 由图 3 和计算表明, 对于 $\lambda_c > 15 \mu\text{m}$ 的 HgCdTe 光导探测器, 工作在 77 K 时有很高的响应率和探测率; 而工作在 105 K , $\lambda_c > 15 \mu\text{m}$ 时, 要具有高的响应率和探测率则相当困难.

1.2 器件结构的设计

对于大光敏面 (如 $2.1 \times 2.1 \text{ mm}^2$), 用单个方块芯片将使器件阻值和响应率受到限制. 我们采用异型结构增大长宽比, 可改善器件性能和应用效果.

我们对器件专门设计了特殊管壳, 进行真空封装, 并使用低温和变温杜瓦瓶, 提高了器件的可靠性, 而且能在低温和变温下工作.

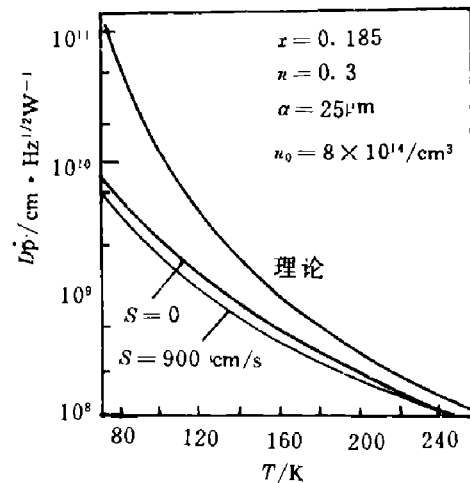


图 3 探测率 D_p^* 与温度关系
Fig. 3 Detectivity as a function of temperature

2 探测器研制

2.1 晶片的选取和芯片的研制

要获得高性能探测器, 首先要对热处理后的晶片进行严格挑选: 用 X 射线貌相、金相观察等方法选择晶片结构; 用密度测量和红外透视光谱测量选取合适组份 ($x < 0.187$); 使材料的载流子浓度、迁移率、电阻率及其温度关系满足设计要求.

由于 HgCdTe 材料很软, 易研磨和切割, 但容易引起位错和形变. 我们在解决刻槽、芯片精密分割、去胶、钝化等工艺技术基础上, 制得直径大于 10 mm 、厚度约 $25 \mu\text{m}$ 的低损伤芯片.

2.2 装架与封装

芯片用低温环氧树脂先粘接在白宝石衬底上, 然后再胶接在管壳底座上, 因此需考虑器件与冷块间的热传导. 假定忽略边缘效应, 用一维热扩散模型估算探测器热阻. 由热辐射和热对流使器件温度上升, 热阻存在引起的温差 ΔT 为

$$\Delta T = \sum_j \frac{d_j}{z_j A_j} P, \quad (6)$$

式(6)中 d_j 、 z_j 、 A_j 分别表示不同的厚度、热导和接触面积; P 是探测器的偏置功率或接收功率. 由于我们较好地解决了芯片胶接工艺技术, 使总的温差 $\Delta T \leq 1.0$ K.

本探测器除用平板窗口封装结构外, 还采用低温聚光器—光敏芯片组合式封装结构. 在封装中我们研究解决了真空密封装置和真空密封工艺技术.

3 探测器特性

3.1 探测器主要参数

历经五年研究, 我们获得一些较高性能探测器, 其功耗一般 < 16 mW, 探测器的主要参数见表 1.

表 1 探测器主要参数

Table 1 The main parameters of the detectors

编号	$R(\Omega)$		R_p (V/W)	V_N (V/Hz ^{1/2})	D_p^* (cmHz ^{1/2} /W)	λ_{co} (50%) (μm)	A (mm ²)
	室温	80K					
8806	40	66	71	2.8×10^{-9}	5.7×10^9	17	2.2×2.2
8819	48	138	85	3.87×10^{-9}	4.97×10^9	> 16.6	2.2×2.2
8902	24	166	377	7×10^{-9}	1.1×10^{10}	> 15.5	2.1×2.1
8903	22	159	386	4×10^{-9}	1.86×10^{10}	18	2.1×2.1
19003	17	70	718	5×10^{-9}	1.43×10^{10}	16	1×1
8 [#] 组件	22	161	1308	3.76×10^{-9}	7.3×10^{10}	> 16.5	2.1×2.1
11 [#] 组件	24	171	1520	1.07×10^{-8}	2.9×10^{10}	> 15.5	2.1×2.1

3.2 主要性能

3.2.1 D_{bb}^* 、 R 与偏流 I_b 的关系

图 4 表示探测器探测率 D_{bb}^* 、响应率 R_{bb} 与偏流 I_b 的关系. 当偏流 I_b 增加到一定值时, R_{bb} 趋于饱和, 这是由于受到少子扫出效应和元件产生的焦耳热 ($I^2 R$) 的影响. 在偏流达到一定值时 D_{bb}^* 也趋于饱和, 而当偏流超过一定值时, D_{bb}^* 会下降, 这是因噪声 V_n 增加引起. 从图 4 可知, 本器件可承受较大的工作偏流.

3.2.2 变频特性与光谱特性

采用红外探测器频谱参数测试仪测试 (GaAs LED: $\lambda_0 = 0.93 \mu\text{m}$ 、 $\Delta f = 0.04 \mu\text{m}$ 、室温 16°C) 变频特性, 频率变化范围为 $300 \sim 200$ kHz. 图 5 是探测器的噪声 V_n 、响应率 R 、探测率 D_{bb}^* 与频率 f 关系的试验结果.

用傅里叶光谱仪测量探测器的相对光谱. 图 6 为部分测试结果.

3.2.3 探测器灵敏度的均匀性

用波长 $11.31 \mu\text{m}$ 铝盐激光测量探测器灵敏面上的响应分布, 小光点直径为 0.2 mm. 图 7 示出部分试验结果. 由图 7 可见均匀性较好.

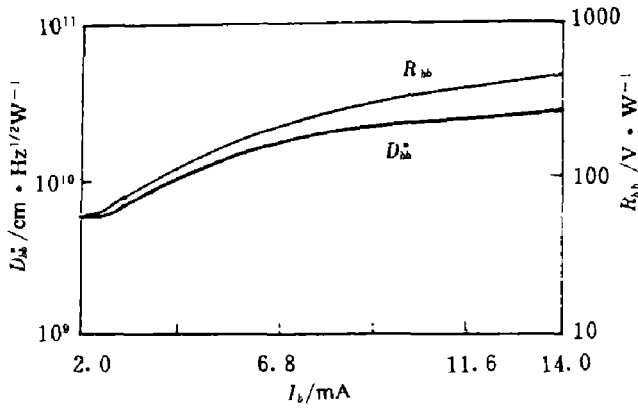


图 4 R_{bb} 、 D_{bb}^* 与 I_b 关系
Fig. 4 R_{bb} 、 D_{bb}^* as a function of I_b

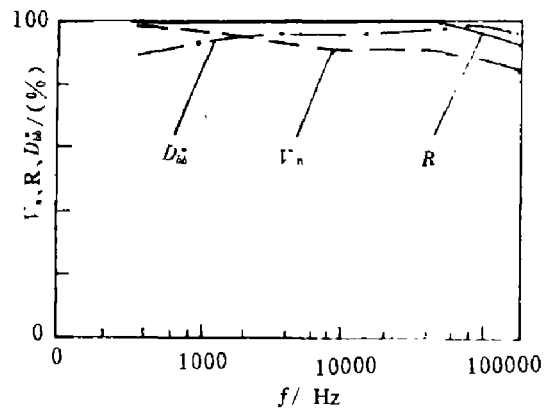


图 5 V_n 、 R 、 D_{bb}^* 与 f 关系
Fig. 5 V_n 、 R 、 D_{bb}^* as a function of f

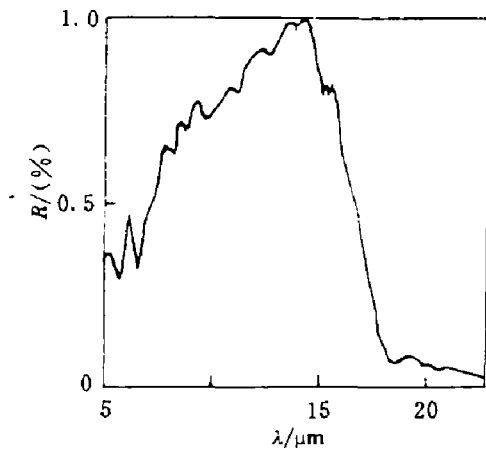


图 6 相对光谱曲线
Fig. 6 Relative spectrum curve

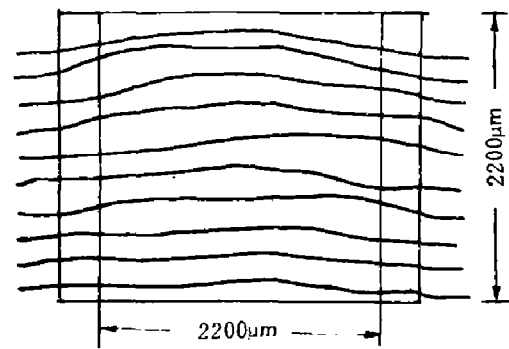


图 7 器件灵敏面的响应分布
Fig. 7 The response distribution on the sensitive element

3.2.4 D_{bb}^* 、 R_{bb} 与温度关系

探测率 D_{bb}^* 、响应率 R_{bb} (信号 V_s)，与温度 T 关系的测试结果 (见图 8)。由图 8 可见，探测器在 105 K 时，其探测率 D_{bb}^* 约为在 LN₂ 时的一半，其响应率 R_{bb} 约为 $\frac{1}{4}$ 。

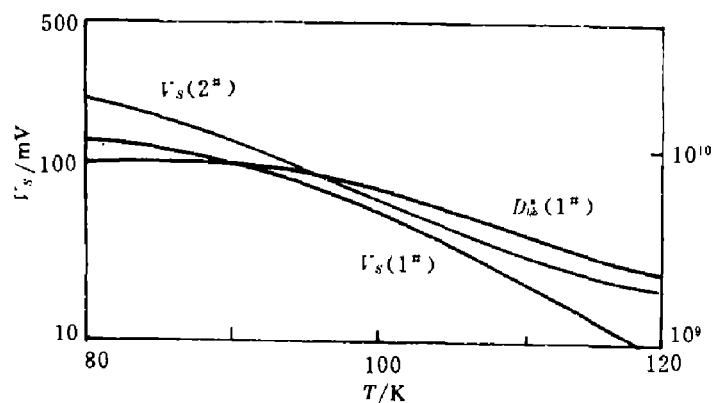


图 8 D_{bb}^* 、 R_{bb} 与 T 的关系
Fig. 8 D_{bb}^* 、 R_{bb} as a function of T

4 结语

我们研制的探测器具有广泛实用性,已在分光辐射计、铀同位素分离技术、激光测试、弱信号探测、光谱分析等方面得到应用,并获得满意结果.

致谢: 探测器的物理分析得到汤定元先生的指教,探测器用的材料是由我所十室材料组提供,部分测试工作得到我所十室测试组、红外物理国家开放实验室和石保安等同志帮助.在此一并致谢.

参考文献

- 1 Junhao Chu, Shichou Xu and Dingyuan Tang. *Appl. Phys. Letts.*, 1983, **43**: 1064
- 2 褚君浩,王戎兴,汤定元. *红外研究*, 1983, **2**(4): 241
- 3 勃莱克莫尔. *半导体统计学*, 上海: 上海科学技术出版社, 1965, 182-201

LONG WAVELENGTH HgCdTe PC INFRARED DETECTOR WITH LARGE AREA

Wang Zimeng, Fang Jiaxiong, Si Chengcai, Hu Yachun, Ma Jiali

(National Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A long-wavelength HgCdTe photoconductor infrared detector with large area has been developed. Simple calculation and the main points of the design are given in this paper. The detector with an area of $2.1 \times 2.1 \text{ mm}^2$ has detectivity $D_p^* (80\text{K}) = 1.86 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, and responsivity $R_p = 386 \text{ VW}^{-1}$ with $\lambda_{co} (50\%) > 18 \mu\text{m}$. An additional novel detector with a special structure of low temperature collectors, which has detectivity $D_p^* (80\text{K}) = 7.3 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ and $\lambda_{co} (50\%) > 16 \mu\text{m}$ has been developed.

Key words: long wavelength, large area, HgCdTe detectors, special structure, collectors.