

卫星用长波 HgCdTe 探测器的研究

方家熊 徐国森 张林法 刘激鸣

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要——报道了卫星用长波 HgCdTe 红外探测器的性能。提出用波段探测率 D_{λ}^* 的概念来表征在 105 K 下特定波段 10.5~12.5 μm 工作的探测器性能。 D_{λ}^* 的值在 $1\sim 3\times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 范围内, 可靠性试验结果表明, 探测器的失效率小于 2.5×10^{-5} 。

关键词——HgCdTe, 红外探测器, 卫星。

1. 引 言

我国风云一号气象卫星的红外扫描辐射计上采用了长波碲镉汞红外探测器-辐射致冷器方案, 从而对碲镉汞探测器提出了一系列苛刻的要求。我们研究了探测器工作温度提高到 105K 时器件的性能变化, 以及器件承受航天工作条件的能力。由于碲镉汞的禁带宽度随温度升高而变大, 引起本征载流子浓度、载流子迁移率和寿命以及表面复合速度的变化, 从而探测器的性能随工作温度变化而变化。我们研究了这些参数的温度关系, 并提出一种新的优值参数, 即用波段探测率来表征在 105 K 下和在特定波段 10.5~12.5 μm 工作的长波碲镉汞探测器的工作实绩。大量的钝化实验和可靠性实验表明, 我们最终研制成的供航天用的长波碲镉汞探测器的性能优良, 工作稳定可靠。

2. 探测器性能的理论分析

讨论在 77 K 工作的基于载流子本征激发过程的 HgCdTe 光导探测器。对于 N 型 HgCdTe 材料, 可以推导出探测器响应率、探测率和噪声表达式:

$$R_{\lambda P} = \frac{\Delta V_s}{P_s} = \frac{\eta \lambda V_0 \sigma}{hc n_0 L w d}; \quad (1)$$

$$D_{\lambda P}^* = \frac{\eta \lambda}{2hc} \sqrt{\frac{\tau}{P_0 d}} = \frac{\eta \lambda}{2hc} \sqrt{\frac{2\tau A_s}{d n_0}}; \quad (2)$$

$$V_{g-r} = \frac{2V_0}{(L w d)^{1/2}} \left[\frac{P_0 \tau \Delta f}{n_0^2} \right]^{1/2}; \quad (3)$$

式(1)~(3)中,入射功率 $P_s = \phi_s h \nu L w$; L, w 分别为探测器的长度和宽度; d 为厚度; V_0 为探测器偏压; η 为量子效率; n_0 为载流子浓度; τ 为有效寿命; τ_{A1} 为俄歇寿命; h 为普朗克常数; c 为光速; λ 为响应波长; n_0 为载流子浓度. 根据式(1)~(3)可以看出,要得到高的响应率和探测率的探测器,要求的材料参数是载流子浓度尽可能低,载流子寿命尽量高,并且要求探测器厚度尽可能薄,量子效率尽可能高.

尽管 77 K 工作的 $8\sim 14 \mu\text{m}$ HgCdTe 光导探测器具有很高的探测率,但要在航天应用中达到 77 K 低温是比较困难的,因此,设计出在 105 K 左右工作、在 $8\sim 12 \mu\text{m}$ 具有高探测率的探测器是很重要的. 下面根据现有的实验数据和资料,选择材料参数,计算出在 105 K 下工作的 $8\sim 12 \mu\text{m}$ HgCdTe 光导探测器所能达到的探测率.

2.1 组分 x 的选择

因为 HgCdTe 材料禁带宽度与温度的依赖关系比较大,所以确定了工作波段后,还要确定工作温度,才能决定材料组分 x . 我们设定卫星用 HgCdTe 光导探测器工作温度为 105 K 左右,根据禁带宽度 E_g 、组分 x 、温度 T 的关系求出截止波长与温度的关系,取经验关系式^[13]为:

$$E_g(x, T) (\text{eV}) = -0.25 + 1.59x + 5.233 \times 10^{-4}(1 - 2.08x)T + 0.32Tx^3; \quad (4)$$

式(4)适用于 $0.17 \leq x \leq 0.6$, $20\text{K} \leq T \leq 300\text{K}$, 利用式(4)可以算出 $x = 0.19 \sim 0.205$ 的各种材料的禁带宽度与温度关系. 然后再以 $\lambda_c = 1.24/E_g(\text{eV})$, 求出截止波长 λ_c 与温度关系. 在 105 K 下,探测器截止波长在 $12.5 \mu\text{m}$ 左右,则材料组分选择在 $x = 0.195 \sim 0.198$.

2.2 载流子浓度

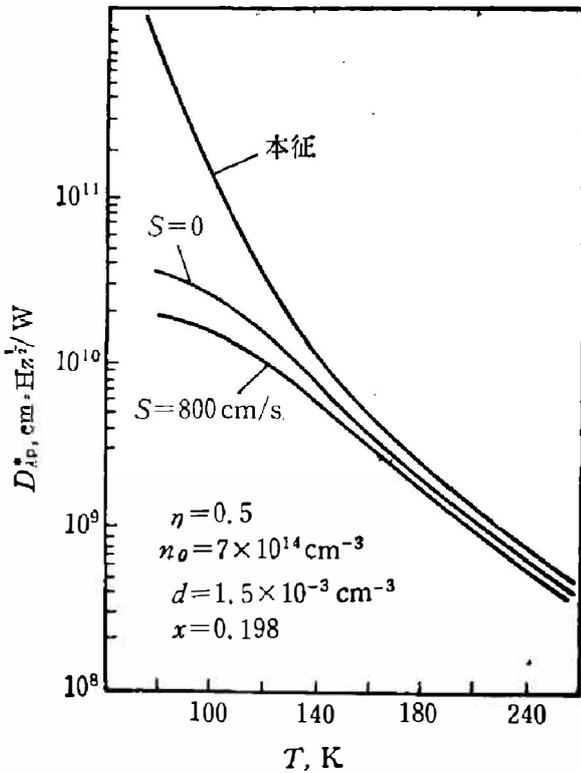


图 1 光谱探测率与温度关系的理论曲线
Fig. 1 The calculated spectral detectivity as a function of temperature.

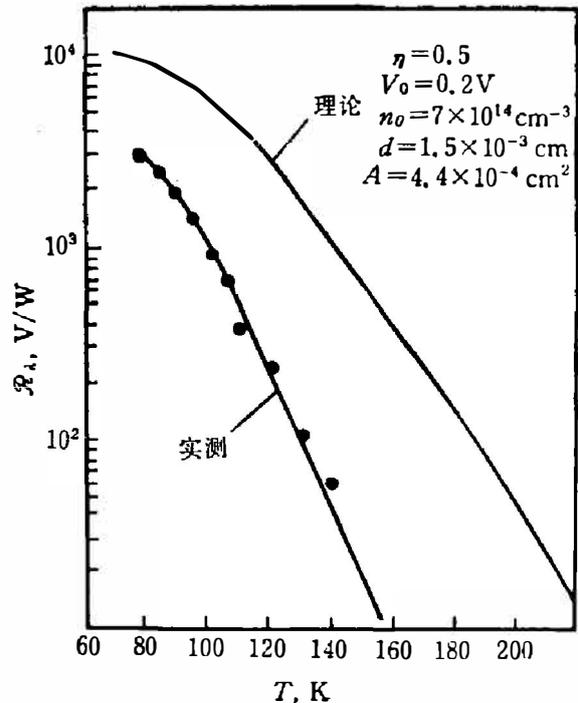


图 2 响应率与温度关系的理论曲线
Fig. 2 The responsivity versus temperature.

根据经验公式,本征载流子浓度可以用下式表示^[1].

$$n_i = (1.093 - 0.296x + 4.42 \times 10^{-4}T) \times 4.293 \times 10 E_g^{3/4} \cdot T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right); \quad (5)$$

由式(5)可以算出本征载流子浓度 n_i 与温度,以及组分 x 的关系. 事实上得到的 HgCdTe 材料,在 77 K 时, n_0 要比 n_i 大一个数量级.

2.3 载流子寿命

载流子寿命的数据估计是比较困难的,对于 x 为 0.205 和 0.195 材料寿命测量表明,在较好的材料中,寿命基本上是碰撞复合,因此,可以推出寿命与温度、禁带宽度关系式:

$$\tau_{A_i} = A \frac{1}{KT} \left(\frac{E_g}{KT}\right)^{1/2} \exp\left(\frac{E_g}{KT}\right); \quad (6)$$

式(6)中, $A = 3.46 \times 10^{-13}$,它是与组分,温度无关的常数.

2.4 探测率与响应率的计算

有了 n_i 和 τ_{A_i} 等数据,就可以估算出峰值探测率和响应率. 假定 77 K 时,材料载流子浓度 $n_0 = 7.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. 所加偏压 $V_0 = 0.25 \text{ V}$, 设表面复合速度不随温度变化. 根据公式(1)~(2)可以作出 $D_{\lambda_p}^*$ 和 R_{λ_p} 与温度的关系曲线(见图 1 和图 2).

由图 1~2 可见,105 K 探测率和响应率与 77 K 探测率和响应率相比较下降 30~50%,所以 8~12 μm 的 HgCdTe 光导探测器在 105 K 下可以得到较高的探测率.

3. 实 验

采用熔体生长方法制备 HgCdTe 单晶. 晶片经过低温热处理后,以一种低损伤减薄工艺来获得光导型探测器光敏元薄片,并对光敏元进行双面钝化处理. 用光导光谱和光磁电两种方法研究了不同表面处理对表面复合速度的影响,同时用光电导衰退方法测定了有效响应时间. 实验表明:一般情况下,表面复合速度 S 小于 1000 cm/s ,最低可小到 100 cm/s ^[2].

我们用通常的方法对探测器的响应率、噪声和探测率以及光谱分布进行了测量. 所用的黑体源为本所研制的 HFY-100 标准黑体,有效发射率为 0.99,温控精度为 $500 \pm 0.1 \text{ K}$.

4. 探测器的性能

4.1 波段探测率

对于风云一号气象卫星,特定波段(10.5~12.5 μm)的平均探测率才是直接的优值性能参数,而单色探测率并不反映器件的演技. 为此,我们定义在 $\Delta\lambda = 10.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 波段内的积分优值因子 $D_{\Delta\lambda}^*$, 并称之为波段探测率 $D_{\Delta\lambda}^*$ ^[3],

$$D_{\Delta\lambda}^* = \int_{10.5}^{12.5} P_b(\lambda) D_{\lambda}^* d\lambda / \int_{10.5}^{12.5} P_b(\lambda) d\lambda;$$

其中, $P_b(\lambda)$ 为 500 K 黑体的单色辐射强度.

由黑体探测率 $D_{b\lambda}^*$ 及光谱测量得出分谱探测率 D_{λ}^* , 然后计算出波段探测率 $D_{\Delta\lambda}^*$.

表 1 列出一些典型器件在 105K 下的性能;表 2 是 105K 的波段探测率 $D_{\Delta\lambda}^*$. 由表 1 和

表 2 可见,在特定的响应波段范围内,探测器峰值探测率 $D_{\lambda_p}^*$ 的高低,并不能真正反映探测器在这一响应波段内的演技. 所以波段探测率 $D_{\Delta\lambda}^*$ 的高低,才能真正反映探测器的演技.

表 1 105 K 下工作的 HgCdTe 探测器性能参数(FOV 60°)

Table 1 The Characteristics of HgCdTe detectors with FOV 60° at 105K.

编号	I (mA)	$D_{\lambda_p}^*$ (cmHz ^{1/2} /W)	\mathcal{R}_{λ_p} (V/W)	λ_c (μ m)	τ (Ω)	A (cm ²)	F_D (mW)
E018	2.5	1.5×10^{10}	3.5×10^3	12.8	42	4.4×10^{-4}	0.3
E020	5.0	1.4×10^{10}	5.2×10^3	13.2	51	4.4×10^{-4}	1.3
8285	9	5.0×10^{10}	3.8×10^4	11.7	46	13×10^{-4}	3.7
8628	12	4.0×10^{10}	1.4×10^4	12.3	20	4.4×10^{-4}	2.9
8617	8	1.6×10^{10}	1.1×10^4	11.9	46	4.4×10^{-4}	2.9
8621	5	2.4×10^{10}	1.7×10^4	13.6	38	4.4×10^{-4}	1.0
8638	10	4.1×10^{10}	1.8×10^4	13.9	23	4.4×10^{-4}	2.3
8629	12	3.8×10^{10}	1.6×10^4	11.8	23	4.4×10^{-4}	3.3

表 2 105K 下的探测器波段探测率 $D_{\Delta\lambda}^*$

Table 2 The spectral band detectivity of detectors $D_{\Delta\lambda}^*$ at 105K.

器 件 号	8285	8628	8617	8621	8638	8629
偏流 (mA)	9	12	8	5	10	12
$D_{\Delta\lambda}^*$ (cmHz ^{1/2} /W)	2.9×10^{10}	2.9×10^{10}	1.1×10^{10}	1.9×10^{10}	2.8×10^{10}	2.2×10^{10}

4.2 探测器的信号与偏流的关系

从式(1)可知,要得到高的响应率就要加大偏压 V_0 ,但在少子寿命较长时将受到扫出效应的限制,而在少子寿命较短时($\tau < 5 \times 10^{-7}$ s),则受到焦耳热 V_0^2/τ 的限制.

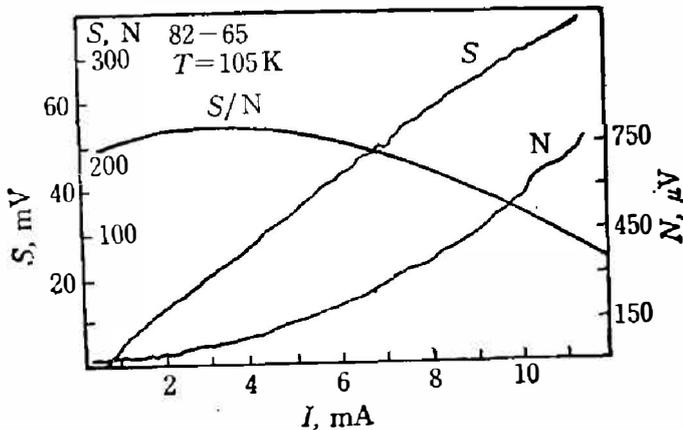


图 3 探测器性能的偏置特性

Fig. 3 Signal-to-noise ratio versus bias current.

图 3 是探测器的偏置特性. 最佳偏置电流在 3 mA 附近. 最佳偏流与探测器的芯片材料及芯片结构有关. 我们对芯片与衬底间的胶接条件进行了研究,确保了器件信号不受焦耳热的影响.

4.3 噪声频谱

对 N 型 HgCdTe 光导器件,频谱在 300 Hz 以上时主要是产生-复合噪声.

$$V_{p-r} = 2V_0(P_0 I \Delta f / w d)^{1/2} / n.$$

由上式计算可知,器件的噪声在 77

K 时比 105K 时要小. 图 4 是器件的噪声频谱,由图 4 可见,实测值与理论估算值十分接近. 低频区是 $1/f$ 噪声,其大小与偏流及制备工艺有关.

4.4 光谱特性和温度特性

随着工作温度的升高,HgCdTe 器件的长波限向短波方向移动,例如组分 $x=0.198$,工作温度从 77K 升到 105K,计算结果长波限变小约 1.1μ m,而且实测值与计算值符合得很

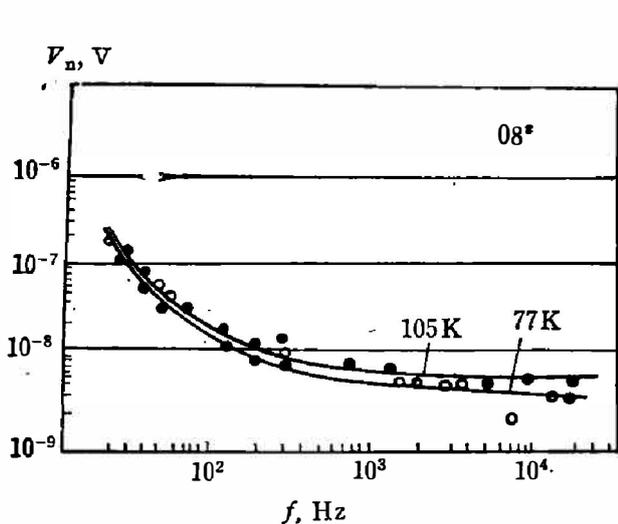


图 4 77 K 和 105 K 的探测器噪声频谱
 Fig. 4 The frequency spectra of detector noise at 77K and 105K.

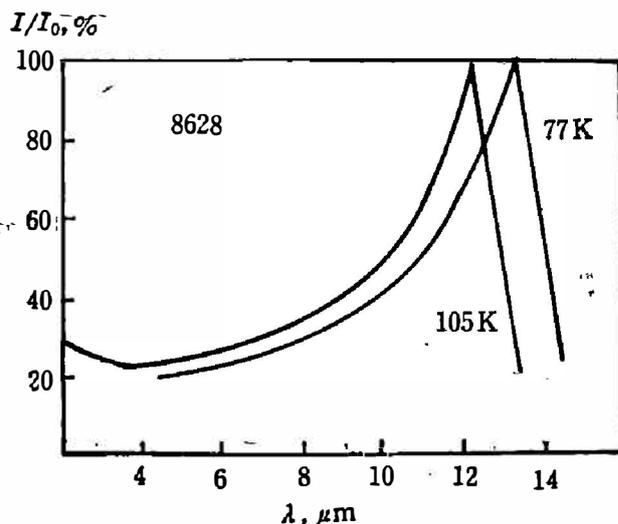


图 5 77K 和 105K 的探测器光谱响应曲线
 Fig. 5 The relative spectral responsivity at 77K and 105K.

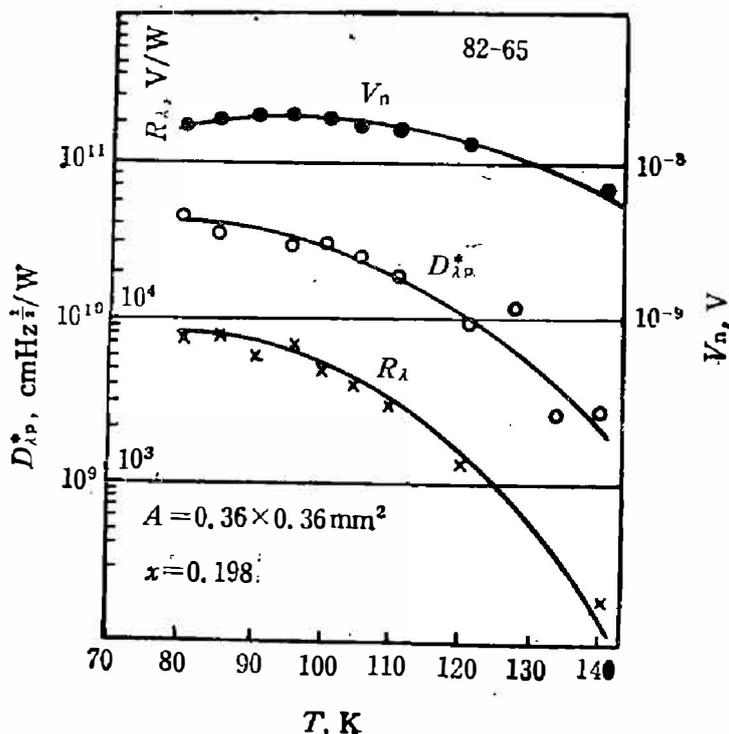


图 6 探测率、响应率、噪声与温度关系
 Fig. 6 The detectivity, responsivity and noise versus temperature in the range from 80 to 140K.

好(见图 5)。器件性能随温度的变化而变化^[4]。从图 1、2 已可看出探测率、响应率与温度关系的理论曲线,而实际上器件的温度特性是各色各样的,图 6 是器件探测率、响应率、噪声与温度关系的实测曲线。在研制过程中我们对每个器件进行温度特性的测量,以保证获得在 105K 下性能合格的器件。

5. 探测器可靠性实验结果

按例行试验条件,对探测器进行了力学和温度试验,并抽样进行了高能粒子辐照试验.

77~300K 热学冲击试验. 要求探测器所用的材料都能耐受77K的低温,但各种材料的热膨胀系数是有差异的.为此,我们采用快速 77~300K 反复循环方法,基本上排除了材料选用不当或工艺不当所带来的隐患.

真空烘烤试验. 由于 HgCdTe 中 Hg 的分解压很高,材料易于受热变化.在超高真空中,我们对探测器加热,同时测量器件性能的变化.结果表明,探测器在约 1×10^{-4} Pa 条件下可以耐受 80°C 的温度.

对经过例行试验的器件,进行电老化和寿命试验以确定器件的平均寿命.我们采用无替补定时截尾试验的方案,累计试验了 2.16×10^4 小时,结果无一失效.按照 Bayes 可靠性理论,并设 HgCdTe 光导探测器为指数型寿命元件,则可得失效率为 2.49×10^{-5} .

经过对在105 K下工作的碲镉汞探测器性能的分析研究,以及空间使用条件的例行试验与寿命试验表明,我们的探测器 $D_{\Delta\lambda}^*$ 优值参数可达 $1 \sim 3 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 失效率小于 2.5×10^{-5} , 经各种整机试验和空间工作,性能优良,工作稳定可靠.

致谢——本工作是在汤定元研究员和匡定波研究员关心指导下进行的,还得到龚惠兴研究员以及本所有关同志的支持,有关人员付出了大量劳动,在此一并表示深切的致谢.

参 考 文 献

- [1] 汤定元,红外物理与技术, (1976), 4~5:68.
- [2] 徐国森,红外物理与技术, (1980), 2:4.
- [3] 方家熊,红外物理与技术, (1980), 2:36.
- [4] 徐国森,红外物理与技术, (1980), 2:12.

STUDY OF LONG WAVELENGTH HgCdTe DETECTOR FOR SATELLITE

FANG JIAXIONG, XU GUOSHEN, ZHANG LINFA AND LIU JIMIN

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, 200083, Shanghai, China)

ABSTRACT

The performances of long wavelength HgCdTe detector used in FY-1 Satellite are reported. The concept of spectral band detectivity $D_{\Delta\lambda}^*$ is presented to characterize detectors operating at 105K for a given spectral band from 10.5 to 12.5 μm . The values of $D_{\Delta\lambda}^*$ are in the range from 1 to $3 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$. The results of tests for reliability indicate that the failure rate of detectors is smaller than 2.5×10^{-5} .