

## 长波光导 HgCdTe 探测器的输运特性

蔡毅<sup>1,2)</sup> 郑国珍<sup>1)</sup> 朱惜辰<sup>2)</sup> 郭少令<sup>1)</sup> 汤定元<sup>1)</sup><sup>1)</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家重点实验室, 上海, 200083;<sup>2)</sup>昆明物理研究所, 云南, 昆明, 650223)

**摘要** 测量了长波光导 HgCdTe 线列探测器在 1.2~300K 的电阻率-温度 ( $R-T$ ) 特性, 结果表明: 高性能和低性能探测元的  $R-T$  特性明显不同, 前者有与正常 HgCdTe 材料  $R-T$  关系相似的变化规律, 后者则与简并 HgCdTe 材料相似. 探测器的性能与最大电阻温度有对应关系.

**关键词** HgCdTe, 光导探测器, 输运特性, 探测器性能, 对应关系.

## 引言

TN304.26

HgCdTe 材料参数和探测器性能的对应关系一直是研制人员关注的问题. HgCdTe 材料的品质最终是从探测器性能上反映出来的, 因此, 高性能探测器必然有好的材料参数, 反之亦然, 这样就可通过探测器来研究 HgCdTe 材料的电学参数与器件性能的对应关系.

由于在器件加工过程中不能检测 HgCdTe 材料的电学参数, 加工成器件后, 材料的几何尺寸从毫米量级减小至微米量级, 材料的不均匀性对器件影响很大, 材料很容易受到应力损伤也是一个问题<sup>[1,2]</sup>, 此外, 研究器件的 HgCdTe 材料的困难还在于不能采用通常有效的霍尔测量方法. 由于电阻率-温度 ( $R-T$ ) 特性是反映半导体输运性质最简单而信息又很丰富的基本关系, 器件性能与材料电学参数直接相关, 所以, 可从探测器的电阻率-温度 ( $R-T$ ) 特性着手, 研究探测器性能和材料参数关系. 人们在长期实践中, 已发现光导 HgCdTe 探测器的室温电阻和液氮温度的电阻之比与器件性能有明显关系<sup>[3]</sup>.

本文中, 为考察长波光导 HgCdTe 线列探测器 (MCTLAD) 的电导机构与器件性能的关系, 测量了探测器的  $D^*$  参数、器件在 1.2~300K 温区的  $R-T$  特性, 分析和讨论了器件输运特性与性能的关系.

## 1 实验结果

样品的  $R-T$  特性是用自行研制的深低温电学参数自动测量系统测得的, 用机械泵对低温恒温器中的液氮减压后获得 1.2K 温度. 用定标过的 Rh-Fe 四线电阻温度计测量温度, 测温范围为 1.1~300K. 当恒温器中无液氮时, 因高真空隔离层的作用, 可使样品温度在很大的范围内变化. 在样品架放入恒温器后, 样品以辐射方式与主氮池交换热量逐渐降温. 计算机快速数据采集能力保证每次测量时, 可认为样品处于准平衡态, 在该过程中不断测量样品的电阻就得到比较准确的  $R-T$  特性.

我们测量了 2 个光导 HgCdTe 探测器的变温电流-电压 ( $I-V$ ) 特性, 结果相同, 如图 1 所

示, 测量了 6 个 33 元光导 HgCdTe 线列探测器中高性能和低性能探测元的关系, 典型的实验结果见图 2~4, 图中圆点为实验值, 实线为计算值. 光导 33 元 HgCdTe 线列探测器探测元尺寸为  $500\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ , 光敏区尺寸为  $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ , 间距  $12\mu\text{m}$ , 厚度约  $10\mu\text{m}$ . 表 1 列出与图 2~4 相应的 HgCdTe 材料和从中选出作为测量样品的探测元的性能数据.

表 1 77K 测得的光导 HgCdTe 探测器样品的材料参数和器件性能  
Table 1 The material parameters and device performances of the samples of photoconductive HgCdTe detectors measured at 77K

材料参数		样品号	6624		6711		8143	
组分	$x$	(mole)	0.214		0.212		0.206	
有效施主浓度	$N_D - N_A$	( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.8 \times 10^{14}$		$3.4 \times 10^{14}$		$3.1 \times 10^{14}$	
电子迁移率	$\mu_e$	( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	$1.1 \times 10^5$		$1.0 \times 10^5$		$1.0 \times 10^5$	
有效寿命	$\tau_{eff}$	( $\mu\text{s}$ )	0.5		0.6			
探测器性能		样品号(探测元)	6624		6711		8143	
			12 <sup>#</sup>	17 <sup>#</sup>	19 <sup>#</sup>	33 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	13 <sup>#</sup>
输出电压	$V_s$	( $\mu\text{V}$ )	0	6.5	0.1	4.8	0.1	4.8
噪声电压	$V_n$	( $\mu\text{V}$ )	0.12	0.21	0.10	0.14	0.10	0.14
电压响应率	$R_v$	( $\text{V/W}$ )	—	$2.9 \times 10^4$	—	$2.2 \times 10^4$	$2.6 \times 10^4$	—
探测率	$D^*$	( $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ )	0	$1.7 \times 10^{10}$	0	$1.3 \times 10^{10}$	0	$1.3 \times 10^{10}$
器件最大电阻率对应的温度	$T_{R \max}$	(K)	142	106	224	136	200	125

表 2 从器件 R-T 特征得出的材料和探测器参数  
Table 2 The material and detector parameters calculated from the R-T characteristics

材料、探测器参数	样品号(探测元)	6624		6711		8143	
		12 <sup>#</sup>	17 <sup>#</sup>	19 <sup>#</sup>	33 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	13 <sup>#</sup>
有效施主浓度 $N_D - N_A (\text{cm}^{-3})$		$1.4 \times 10^{16}$	$5.8 \times 10^{14}$	$1.6 \times 10^{16}$	$1.6 \times 10^{14}$	$1.1 \times 10^{15}$	$1.2 \times 10^{16}$
电子迁移率 $\mu_e (\text{cm}^2/\text{Vs})$		$3.0 \times 10^4$	$5.4 \times 10^5$	$2.5 \times 10^4$	$2.5 \times 10^5$	$2.6 \times 10^5$	$3.8 \times 10^4$
电压响应率 $R_v (\text{V/W})$		—	$4.7 \times 10^4$	—	$1.7 \times 10^4$	$2.5 \times 10^4$	—

## 2 分析和讨论

从图 2~4 可知, 高性能和低性能探测器的 R-T 曲线形状明显不同, 前者有相当大的变化, 后者变化很小. 高性能探测元的电阻率随温度降低先增大, 在 100~150K 达到最大值后再降低, 样品 6624-17<sup>#</sup>、6711-33<sup>#</sup> 和 8143-3<sup>#</sup> 分别在 106、136 和 125K 时达到最大. 在 1.2K, 高、低性能探测元有相当低的电阻率, 而在 1.2 和 300K, 两者电阻率相差不大.

不同的 R-T 曲线表明, 高、低性能探测元的 HgCdTe 材料在载流子和散射机制上有差别. 高性能探测元和正常 HgCdTe 材料的 R-T 曲线形状相似, 可通过 A、 $R_{\max}$ 、C、D 将其分为 3 段. A~ $R_{\max}$  段是材料的本征导电区, 最大电阻率对应的温度  $T_{R \max}$  是过渡区的起始点,

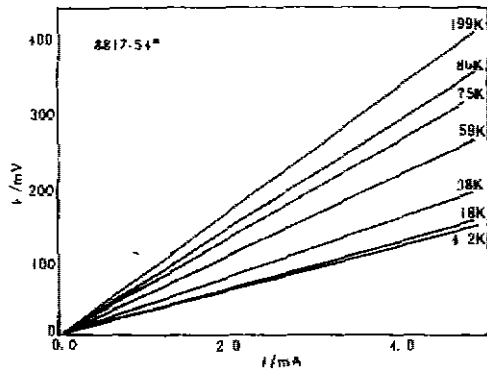


图1 8817-54<sup>#</sup> 光导 HgCdTe 探测器的  $I$ - $V$  特性  
Fig.1 The  $I$ - $V$  curves of No. 8817-54  
photoconductive HgCdTe detector

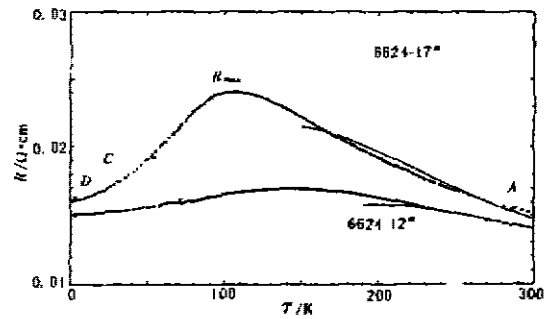


图2 6624 MCTLAD 高、低性能  
探测元的  $R$ - $T$  关系  
Fig.2 Temperature dependence of the resistivity  
for high and low-performance detective  
elements in No. 6624 MCTLAD

$R_{max} \sim C$  段是过渡区,  $C \sim D$  段是低温区. 在本征区, 温度降低, 本征载流子浓度减少而迁移率增加, 因为本征载流子随温度的变化比迁移率快, 所以电阻率指数增加. 在本征区起控制作用的极性光学声子和电子-空穴散射机构在过渡区影响减弱, 使迁移率升高, 而电阻率则呈指数减少. 在低温区, 电离杂质散射的作用增强, 迁移率的增加变慢, 材料相应的电阻率变化很小. 因载流子浓度是温度的指数函数, 低性能探测元的  $T_{R_{max}}$  较大, 说明 HgCdTe 材料热平衡电子浓度高, 当高到使材料处于强简并态时, 就造成电子浓度与温度的弱相关. 高的电子浓度使载流子间的强散射对迁移率的影响很大, 致使简并 HgCdTe 材料的电阻率在 1.2 ~ 300K 的范围内随温度的变化很小.

在窄禁带 n 型 HgCdTe 半导体中, 杂质往往是浅施主, 所以热冻结效应很弱. 降温至某一温度时, 热平衡电子浓度等于杂质浓度, 再降温, 载流子浓度不随温度变化. 载流子机构的这一变化在  $R$ - $T$  曲线上由  $T_{R_{max}}$  反映出来. 当温度降低到本征载流子浓度等于杂质浓度时, 因热平衡空穴浓度低, 其贡献可忽略, 有

$$n_1(x, T_{R_{max}}) \approx N_D - N_A. \quad (1)$$

所以, 组分  $x$  一定时, 测出探测器的  $T_{R_{max}}$ , 就能用已知的本征载流子浓度公式<sup>[4]</sup>求得杂质浓度. 对平衡态的 n 型 HgCdTe 材料可以只考虑电子导电, 其电导率为

$$\sigma(x, T) = n_0(x, T) \mu_e(x, T). \quad (2)$$

有人通过测量 HgCdTe 材料室温的电阻率推算出组分  $x$ <sup>[6]</sup>, 但精度较低. 如果由实验测得本征区的  $\sigma(T)$ , 而该温区  $n_0(x, T)$  的函数关系是已知的, 再求出  $\mu_e(x, T)$  的函数关系, 就可利用式(2)确定材料的组分  $x$  和迁移率  $\mu_e$ , 进而计算出探测器的电压响应率  $R_v$  等参数. 用这种方法求得被测样品的材料参数也列在表 2 中.

从表 1 可知, 高性能探测元电压响应率  $R_v$  的测量值和计算值符合得相当好, 说明根据

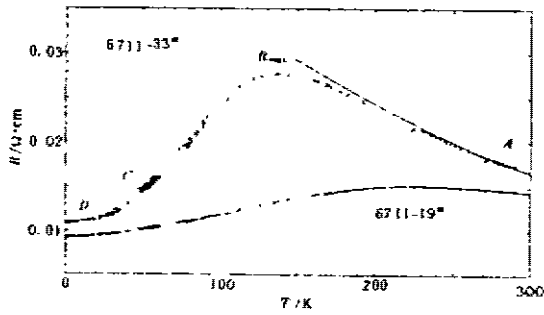


图 3 6711 样品高、低性能  
探测元  $R$ - $T$  关系

Fig. 3 Temperature dependence of the resistivity for high and low-performance detective elements in No. 6711 detector

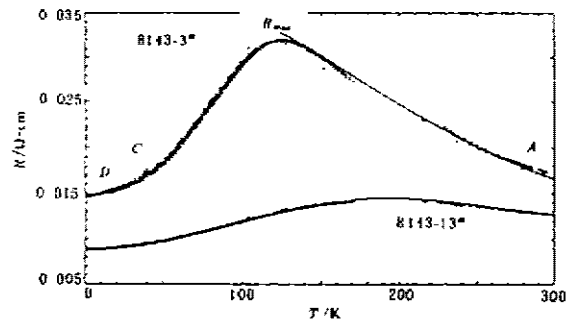


图 4 8143 样品高、低性能  
探测元  $R$ - $T$  关系

Fig. 4 Temperature dependence of the resistivity for high and low-performance detective elements in No. 8143 detector

测量数据算出的器件材料参数是可信的;而低性能探测元材料的高载流子浓度表明其处于简并态.可见,做成器件后,HgCdTe 材料的电学参数发生了变化,其原因可能是 HgCdTe 材料电学参数分布不均匀,也可能是 HgCdTe 材料在器件加工过程中受到损伤,或两者兼有.

样品置放于 1.2K 恒温器中,不存在背景光子激发问题,在这一温度下参加导电的电子全部由浅施主提供,探测器很低的电阻率表明材料中的浅施主浓度相当高.除杂质外,位错等晶格缺陷也可向导带提供电子.在 6624<sup>#</sup> 样品芯片的高分辨同步 X 射线形貌相中,低性能的 12<sup>#</sup> 探测元和高性能的 17<sup>#</sup> 探测元光敏区的衬底明显不同<sup>[2]</sup>. 12<sup>#</sup> 探测元光敏区表明存在亚晶界的取向衬度,17<sup>#</sup> 探测元光敏区是说明晶格比较完整的直接象.两个探测元相距 260 $\mu$ m,杂质在如此小的范围内分布应该是均匀,因此断定 12<sup>#</sup> 探测元简并所需的电子来源于器件工艺引入的亚晶界,这说明 HgCdTe 材料在器件工艺中受到损伤可以造成简并.

光激发电子要满足量子选择定则才能实现价带和导带间的跃迁.在强简并态下,导带的态密度因被热平衡态电子填充使空的态密度减少,这样就降低了满足跃迁选择定则的光生电子数,所以光生电子从价带跃迁到导带的几率也随之减小,使得由简并材料构成的探测元的光电导信号很小,甚至无信号.这与因复合中心浓度高造成探测元性能退化有所不同,在后一情况下,表现为探测器信号小,产生-复合噪声大.构成低性能探测元的 HgCdTe 材料处于简并态的另一个实验证据是探测器噪声数据,对同一个 HgCdTe 线列探测器,除产生-复合噪声机构外,探测元的其它噪声机构可认为是相同的,一旦 HgCdTe 材料简并,因产生少,复合也少,探测元的噪声也就很小.

### 3 结 语

通过对实验结果的分析,可以认为:制成器件后,HgCdTe 材料的电学参数确实发生了变化.因高性能和低性能探测元的 HgCdTe 材料的导电规律有差别,故其  $R$ - $T$  关系明显不同.高性能探测器有与正常 HgCdTe 材料  $R$ - $T$  关系相似的变化规律,而低性能探测器表现出与简并 HgCdTe 材料相似的  $R$ - $T$  特征.探测器性能与其最大电阻温度有对应关系,最大

电阻温度低的探测元有高性能,反之则是低性能或无性能的.器件工艺在 HgCdTe 材料中引入的缺陷起浅施主作用,可使 HgCdTe 材料简并.简并后,因导带的态密度被平衡态电子填充,使空穴的密度减少,降低了满足跃迁选择定则的光生电子数,所以光生电子从价带跃迁到导带的几率也随之减小,进而形成低性能或无性能探测元.

**致谢:**昆明物理所肖绍泽、李丽、李全葆和梁宏林、洪锦华、张玉堂、顾伯奇、陈爱萍、吴思晋、裘萍和康蓉等先生在制作样品方面给予了帮助,上海技术物理研究所红外物理国家实验室刘坤、桂永胜博士分别在计算机程序和迁移率计算方面给予了帮助,作者在此表示衷心的感谢.

### 参考文献

- 1 蔡毅,等.红外技术,1993,15(6):5
- 2 蔡毅,等.红外与毫米波学报,1994,13(5):385
- 3 姚英,梁宏林.红外与毫米波学报,(待发表)
- 4 褚君浩,等.红外研究,1983,2(4):241
- 5 Kopanski J J, et al. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1992, B10(4):1553

## THE TRANSPORT PROPERTIES OF THE LONG-WAVE PHOTOCONDUCTIVE HgCdTe DETECTORS

Cai Yi<sup>1,2)</sup> Zheng Guozhen<sup>1)</sup> Zhu Xicheng<sup>2)</sup> Guo Shaoling<sup>1)</sup> Tang Dingyuan<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>National Laboratory for Infrared Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China,

<sup>2)</sup>Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China)

**Abstract** The temperature dependence of the resistivity for the long-wave photoconductive HgCdTe linear array detectors was measured at the temperature from 1.2 to 300K. The experimental results show that there exists a significant difference in the temperature dependence of the resistivity between high-and low-performance detective elements. The temperature dependence of the resistivity of high-performance detective elements is similar to that of the normal HgCdTe material, whereas the temperature dependence of the resistivity of low-performance detective elements is similar to that of the degenerate HgCdTe material. There is a correlation between the detector performance and the temperature at which the detector has its maximal resistance.

**Key words** HgCdTe, photoconductive detectors, transport properties, detector performances.