

# 变温长波碲镉汞光电导现象研究

郑为建 朱惜辰 梁宏林 保红珍

(昆明物理所, 云南, 昆明, 650223)

TN201

**A** **摘要** 报道了  $n$  型  $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$  光电导体的变温材料参数与性能参数的对照关系, 并讨论了材料的纹条参数与小芯片霍尔参数的差异, 得到一组光电导的实验优化数据. 实测小芯片载流子浓度  $n \approx 1.8 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ , 这与高性能器件实测值的倒推数值一致, 这被解释为长波红外高背景辐射的结果.

**关键词** 碲镉汞, 光电导, 背景辐射.

光电学

## 引言

碲镉汞在材料制备与器件工艺上都有一定的难度, 尤其是材料参数与器件性能的对应关系, 一直是实验和理论两方面的大问题<sup>[1]</sup>. 实验上材料与器件参数, 只能从统计的角度作定性考察, 还缺乏在机理上的深入研究<sup>[2]</sup>. 理论上假定了  $\Delta n \ll n_0$ , 定义了一个不可逾越的理论限-背景限探测率, 然而, 近来实验结果表明可以大于这个极限<sup>[3]</sup>, 因此, 有必要对此假定进行分析和研究.

文章报道了对于  $x=0.2$  的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  长波光电导作的一系列实验, 并与理论计算结果作比较, 考察了载流子的散射过程、光电导现象与温度的关系等, 对器件和材料之间出现的不对应关系进行了分析和讨论.

## 1 实验

为了最大限度地去掉反复多次的工艺处理对测试结果带来的不利影响, 以满足获取同等状况的材料和器件性能参数信息的要求, 设计了 6 引线大面积碲镉汞光导特殊样品<sup>[4]</sup>. 在完成了常规器件工艺后, 能够同时用于材料电学参数和器件性能参数的测试. 首先进行液氮温度与室温的 Hall 系数测试, 从中挑选出组分  $x$  值等参数合适的样品 Z1、Z4 和 Z5; 再进行了变温 Hall 系数、器件伏安特性、响应率、探测率及光谱特性等项测试. 其中典型样品 Z5, 在  $T=100\text{K}$ ,  $f=1\text{kHz}$  的测试条件时, 测得探测率  $D_{10}^* = 2.54 \times 10^{10} \text{W}^{-1}\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ , 接近背景限, 其峰值波长  $\lambda_p$  为  $11.56\mu\text{m}$ . 而 Z1、Z4 在液氮温度的黑体探测率  $D_{10}^*$  分别为  $8.7 \times 10^7$  和  $2.8 \times 10^8 \text{W}^{-1}\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ .

## 2 分析与讨论

### 2.1 组分

利用液氮与室温的电学参数可以估算出  $n$  型碲镉汞样品中 CdTe 的克分子组分  $x$  值<sup>[5]</sup>.  $n$  型碲镉汞中的热平衡载流子浓度可表示为

$$n_0 = 1/2(n_d + \sqrt{n_d^2 + 4n_i^2}), \tag{1}$$

式(1)中,  $n_d$  为净剩余施主浓度,  $n_i$  为本征载流子浓度. 根据诸君浩<sup>[6]</sup>的经验公式:

$$n_i = (1 + 3.25kT/E_g)9.56 \times 10^{14} E_g^{3/2} T^{3/2} [1 + 1.9E_g \exp(E_g/2kT)]^{-1}, \tag{2}$$

式(2)中,  $E_g = -0.295 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2)10^{-4}T + 0.35x^4$ .

根据 G. L. Hansen 和 J. L. Schmit<sup>[7]</sup>公式

$$n_i = (5.585 - 3.820x + 1.753T^{-3} - 1.364 \times 10^{-4}xT)10^{14} E_g^{3/4} E_g^{3/4} T^{3/2} \exp(-E_g/2kT), \tag{3}$$

式(3)中,  $E_g = -0.302 + 1.93x + 5.35 \times 10^{-4}T(1 - 2x) - 0.810x^2 + 0.832x^3$ .

如果略去背景辐射的影响, 式(1)中  $n_0$  用 300K 的实测载流子浓度代入, 用 77K 的实测载流子浓度替代  $n_d$ , 可粗略估算出样品中 CdTe 的克分子组分  $x$  值(见表 1).

表 1 n 型 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 样品 CdTe 克分子组分  $x$  值表  
Table 1 CdTe composition mole  $x$  value in n-Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te Samples

样品编号	材料号	杂质浓度(cm <sup>-3</sup> )	低阻电子浓度(cm <sup>-3</sup> )	文献[6]	文献[7]
Z1	T8803-5	1.35E+15	2.90E+16	0.215	0.21
Z4	V8707SB-76	2.04E+15	2.80E+16	0.215	0.21
Z5	L8810SB-51	1.80E+15	3.02E+16	0.21	0.205

由典型样品 Z5 光谱测试结果 ( $T = 100K$ ):  $\lambda_p = 11.56\mu m$ ,  $\lambda_c = 12.15\mu m$ , 可推出  $x = 0.205$ , 这与表中  $x$  估算值基本符合.

### 2.2 载流子的散射过程

图 1 是样品电子迁移率与温度的关系, 由图 1 可见 Z1 样品迁移率随温度的上升下降较快. 进一步地对 3 个样品作了  $\mu_n T^{3/2} \sim T$  图(见图 2), 显示出 77K~200K 温区内 Z4、Z5 的  $\mu_n \propto T^{-3/2}$ . Z4、Z5 的载流子散射过程以晶格散射为主<sup>[8]</sup>; 而 Z1 载流子的散射过程以电离杂质散射为主.

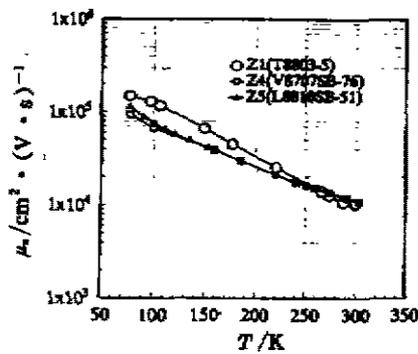


图 1 样品电子迁移率与温度的关系  
Fig. 1 Electron mobility vs. temperature

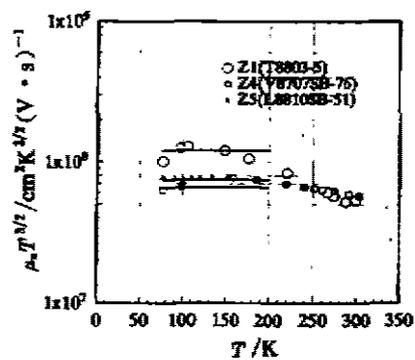


图 2 样品迁移率  $\mu_n T^{3/2} \sim T$  关系  
Fig. 2 Temperature dependence of electron mobility  $\mu_n T^{3/2}$

图 3 是样品实测电阻率与温度的关系, Z1 样品的电阻率明显低于 Z4、Z5, 说明尽管 Z1 的载流子浓度低、电子迁移率高, 但是载流子的散射过程以电离杂质散射为主, 因此, 电导率较大. 这与器件性能探测率  $D^*$  的测试结果一致, 这可说明某些器件的阻抗作不高的原因. 也说明目前常规检测 77K 的 Hall 数据不足以完全反映材料的品质.

### 2.3 载流子浓度

图 4 是由 Hall 参数算出的载流子浓度实验数据. 图 4 中 77K 的数据是由样品浸没在液氮中测得的, 原设想背景温度也应为 77K; 由图 5 可见载流子浓度与 300K 背景  $\pi$  视场的变温杜瓦测试数据衔接得很好. 说明前者的背景辐射也是以透射 300K 为主的, 这与以往的认识有所不同.

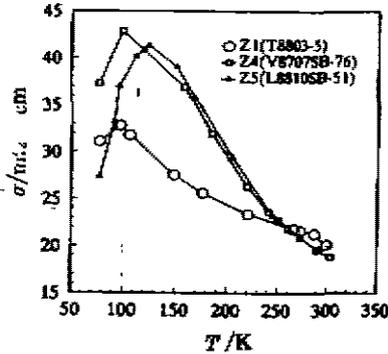


图 3 样品电阻率与温度的关系  
Fig. 3 Resistivity vs. temperature

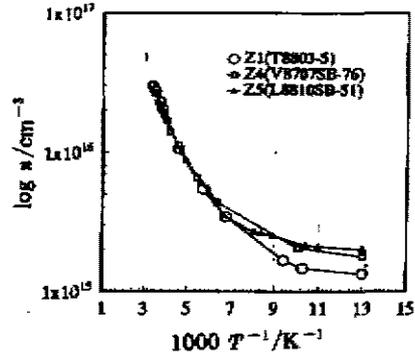


图 4 载流子浓度与温度的关系  
Fig. 4 Measured carrier concentration vs. temperature

非平衡载流子浓度由下式确定<sup>[9]</sup>:

$$n_e = \eta \Phi_0 \tau \sin(\theta/2) / d, \quad (4)$$

式(4)中, 载流子寿命主要由 3 部分组成:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_s}, \quad (5)$$

式(5)中  $\tau_s$  为肖克莱-里德复合寿命, 对于晶格散射为主的近本征半导体, 此项可以忽略不计. 因此, 只须考虑俄歇复合寿命  $\tau_A$  与辐射复合寿命  $\tau_R$  两项:

$$\tau_A = \frac{2n_i^2 \tau_{A0}}{(n_0 + p_0 + \Delta p)(n_0 + \Delta p) + \beta(p_0 + \Delta p)}, \quad (6)$$

$$\tau_R = (B_r(n_0 + p_0 + \Delta p))^{-1}, \quad (7)$$

式中  $B_r$  为辐射复合率,  $\beta$  为俄歇复合率.

将式(4)与式(6)和式(7)分别联立, 再迭代回式(4)、(5), 可得到  $\tau_A$ 、 $\tau_R$ 、 $\tau$  与  $n_e$ . 样品中的载流子浓度主要由两部分组成:  $n = n_0 + n_e$ .

图 5 为净剩余施主浓度  $n_d = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  和  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  两种条件下的两组载流子浓

度、平衡载流子浓度与非平衡载流子浓度与温度的关系 $(n_1, n_{01}, n_{e1})$ 和 $(n_2, n_{02}, n_{e2})$ . 与实验曲线比较, 第一组  $n_d = 5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$  的计算数值  $n_1$  偏低, 而第二组  $n_d = 1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  的计算数值  $n_2$  与实验曲线接近. 其解释为: (1) 晶体内净剩余施主浓度  $n_d$  大于  $1 \times 10^{15}$ , (2) 净剩余施主浓度  $n_d \approx 5 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{15}$ ; 还有其他部分的载流子浓度贡献, 如表面阳极氧化等工艺引入的  $n$  型表面累积效应<sup>[10]</sup>和电场分布的影响<sup>[11]</sup>. 有一点是肯定的, 即背景辐射直接影响着小芯片长波碲镉汞光电导样品的载流子浓度.

2.4 探测率

仅考虑背景辐射引入的产生-复合噪声, 光谱探测率可表示为<sup>[12]</sup>:

$$D_p^* = \frac{\eta \lambda}{2hc} \left( \frac{T}{d \cdot n_e} \right)^{1/2} \left( \frac{1 + 2n_e/n_0}{1 + n_e/n_0} \right)^{1/2}, \tag{8}$$

黑体探测率乘一个  $G$  因子为  $D^* = G D_p^*$ .

由式(1)、(3)、(4)和(8)算出实际可能达到的黑体探测率(见图6), 由图6可见, 在100K附近的实测探测率很接近理论值. 室温附近的实测探测率比理论值低一个数量级, 这是因为  $1/f$  噪声在高温区迅速增长的结果<sup>[4]</sup>.

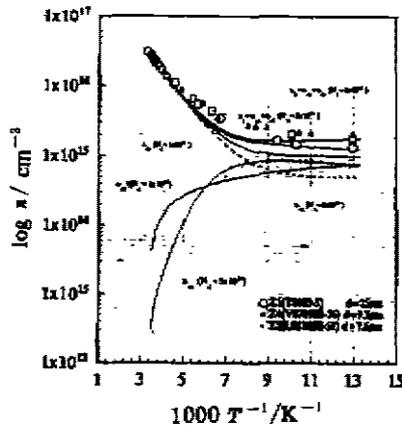


图5 载流子浓度与温度的关系  
Fig. 5 Theoretical & experimental carrier concentration vs. temperature

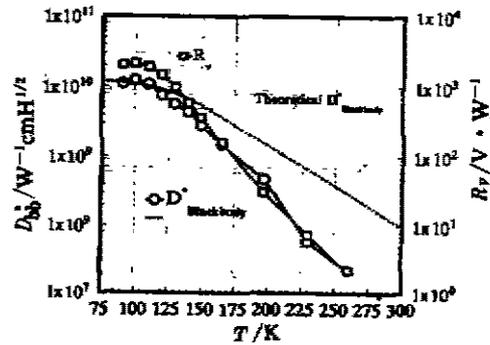


图6 探测率与响应率的实验与理论值  
Fig. 6 Theoretical and experimental  $D_p^*$  &  $R_p$  of Z5 vs. temperature

再由实测光谱数据算出<sup>[13]</sup>:

$$G^{-1} = R_1 / \Sigma g_i R_i = 2.02; \tag{9}$$

式(9)中,  $g_i$  为  $\lambda$  波段内的黑体辐射率,  $R_i$  为  $\lambda_i$  波段内的响应率. 由实测 100K 处黑体探测率  $D^* = 1.26 \times 10^{10} \text{W}^{-1} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ , 推出  $D_p^* = 2.54 \times 10^{10} \text{cm} \text{W}^{-1} \text{Hz}^{1/2}$ , 接近背景限  $(3.3 \times 10^{10} \text{W}^{-1} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2})$ .

2.5 由性能倒推的载流子浓度

将合理地选取的参数:  $\Phi_0 = 8.6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ,  $\eta = 0.5$ ,  $\tau = 1 \mu\text{s}$ ,  $d = 10 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 180^\circ$  和  $hc = 1.986 \times 10^{-18}$  等常数代入式(4), 得到非平衡载流子浓度:  $n_e = 4.3 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ; 将  $\lambda_p$ ,  $D_p^*$  的实测

数据代入式(8),得, $n_0=8.59 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ;则样品的载流子浓度为: $n=n_e+n_0=1.389 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ .这一结果与 Hall 测试数据基本吻合.

基于以上分析,讨论如下:

(1) 长波碲镉汞光电导样品中,77K 以下的载流子浓度实测值与铰条参数的差异,其主要原因可归结为长波红外高背景辐射的贡献.

(2) 实验结果的理论分析表明,实验样品的材料参数约为: $x=0.20 \sim 0.21$ 、 $n_d=5 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 、 $\mu_e \geq 1.5 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 、 $\tau \approx 1 \mu\text{s}$  与 77K 的铰条参数  $x=0.2$ 、 $n_d=5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 、 $\mu_e \approx 1.5 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 、 $\tau=1.5 \mu\text{s}$  相符;它与器件设计要求的材料参数吻合.如果是晶格散射为主,可以做出高性能的光电导样品.

(3) 由于载流子散射过程的差异,通常使用的 77K 碲镉汞电学参数有时不足以反映出材料的品质;需开展变温物理研究,以揭露深层次的物理现象.

(4) 对于载流子浓度,另有一部分载流子的贡献可能来自  $n$  型薄样品( $d \leq 10 \mu\text{m}$ )的表面阳极氧化层的  $n$  型累积效应与电极形状的影响.但这些效应对红外探测器的性能没有显著的直接贡献.

### 3 结语

经过对长波碲镉汞光电导的变温特性的研究,获得了许多第一手的资料,有助于澄清光电导现象中的一些问题;将对光电导理论研究有一定借鉴作用.由于载流子散射过程的差异,通常使用的 77K 碲镉汞电学参数有时不足以反映出材料的品质,这是某些碲镉汞材料参数与器件性能不对应的原因之一.对应高性能样品的载流子浓度  $n >$  铰条数据  $n_0$ ,其原因因为红外高背景辐射激发了长波碲镉汞中的大量载流子;这否定了长波碲镉汞器件理论中  $\Delta n \ll n_0$  的基本假定.

### 参考文献

- 1 汤定元. 红外物理和技术,1976,(4~5):65
- 2 曾光丽,等. 红外技术,1986,8(5):17~20
- 3 梁宏林,等. 红外技术,1994,16(5):1~5
- 4 Zheng W J, et al. *Infrared Phys*,1992,33(1):27~31
- 5 萧继荣. 红外技术,1990,12(5):16~18
- 6 诸君浩,等. 红外研究,1983,(2):8~12
- 7 Schmit J L, Hansen G L. *J. App. Phys.*,1983,54(3)
- 8 刘恩科,等. 半导体物理学,上海:上海科学出版社,1984:84
- 9 梁宏林. 红外技术,1986,8(5):6~16
- 10 Petriz R L. *Phys. Rev.*,1958,110:1254
- 11 梁宏林. 红外与激光技术,1992,(5):47
- 12 Long D, Schmit J L. *Semiconductors and Semimetals* (5),1970:216
- 13 Paul W K, et al. *Elements of Infrared Technology*, John Wiley & Sons,1962:384

## STUDY OF LWIR PHOTOCONDUCTIVE PHENOMENON OF MCT AT DIFFERENT TEMPERATURE

Zheng Weijian Zhu Xichen Liang Hongling Bao Hongzhen

(*Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China*)

**Abstract** The relationship between material characteristics and the device performances of  $n$ -type  $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$  at different temperature was reported, and the difference of Hall parameter between ingot and chip was discussed. The optimized parameter was obtained in the experiment. The measured carrier concentration  $n \approx 1.8 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  is consistent with the derived value of the device of high performance.

**Key words** mercury cadmium telluride, photoconductivity, background radiation.