

# $n^+$ InSb/ $\text{PHg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 异质结的液相 外延生长及红外探测器

吴长树 李 焱  
(昆明物理研究所)

## 提 要

本文报道用水平滑舟系统液相外延制备  $n^+$  InSb/ $\text{PHg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  异质结。该异质结外延层厚度在  $15\sim 25\ \mu\text{m}$  之间,由电镜扫描分析出外延层和衬底之间的介面平直,组分过渡很陡。采用该异质结能制备  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  ( $x=0.3$ )、 $8\sim 14\ \mu\text{m}$  ( $x=0.2$ ) 两波段的红外探测器,从介绍的单元器件的性能来看,该材料是红外焦平面阵列研究方面极有希望的遴选对象。

## 一、引 言

目前  $3\sim 5$  和  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  波段的热成像系统,较多地采用  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  (MCT) 为材料,用扩散法或离子注入法制备  $p-n$  结来获得红外探测器<sup>[1,2]</sup>,但其制备工艺较为复杂,要想通过对结深和掺杂浓度的控制,制得大面积均匀的  $p-n$  结是较为困难的。特别是用扩散法工艺,很难提高器件阻抗;表面复合对器件性能影响也较大,器件成品率很低。本文报道常规的  $n^+$ -PInSb 同质结的液相外延法<sup>[3]</sup>,在  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  衬底上,制成  $n^+$ InSb/ $\text{PHg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  异质结,从而克服上述的不足,并在材料生长,  $p-n$  结的形成以及器件性能等方面,获得改善与提高。

## 二、实 验

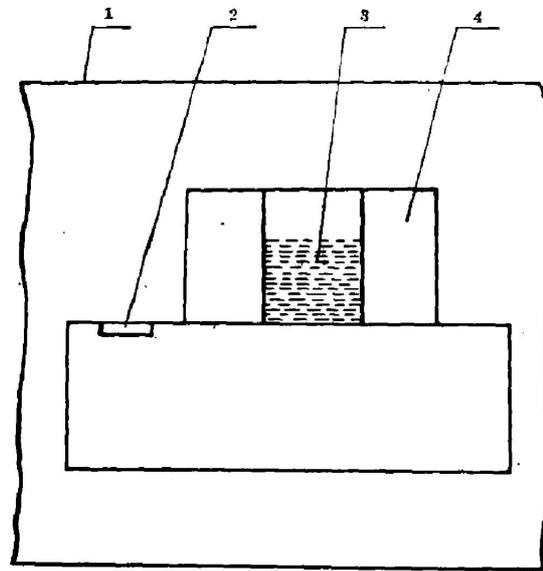
### 1. 实验过程分析

为了制备理想的异质结,两半导体相接触的界面,应具有较为完整的原子键合,因此,它们的晶体结构类型和晶格常数,必须首先满足匹配条件。表1列出 InSb 和  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料的基本参数。从中清楚看出, InSb 和  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  同属闪锌矿型晶格结构,其晶格常数十分接近(失配度小于 0.22%),热膨胀系数也很相近,因此,两者是制成异质结的理想材料。由于 InSb 熔点远低于  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ,故易实现甚低温度下,采用液相外延法生长 InSb/ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  异质结构,并在外延生长过程中,于介面处直接获得理想的  $n^+-p$  结,从而为制备器件,提供了方便的途径。

液相外延生长是在一个改进后的开管滑舟系统(图1)中进行的。异质结的生长温度变化曲线由图2给出,其中为获得  $n^+$  型 InSb 外延层,源中需加入过量的 Te 作掺杂剂。 $n^+$  型

Table 1 Parameters of InSb and  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 

charact	InSb	$\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$	$\text{Hg}_{0.3}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$
300 K	0.18	0.293	0.165
0 K	0.235	0.236	0.046
crystal structure	zincblende		
lattice constant $\text{\AA}$	6.479	6.466	6.465
thermal expan. coeff. ( $10^{-6}/\text{K}$ )	5.04	$\sim 5$	$\sim 5$
optical refrac. index ( $n$ )	3.9	3.6	3.5

Fig. 1 Schematic diagram of growth system for LPE  $n^+$ - $p$  InSb/ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ .

1—open-ended quartz tube; 2— $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  substrate;  
3—In+InSb source; 4—graphite boat

载流子浓度和透过红外光的截止波长  $\lambda_c$  的关系, 由下式确定<sup>[4, 5]</sup>:

$$\lambda_c = \lambda_0 \ln\left(\frac{n_0}{n}\right), \quad (1)$$

式中  $\lambda_0 = 0.65 \mu\text{m}$ ,  $n_0 = 2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 。只要  $n^+$  浓度选得适当, 以外延层作受光面, 对于入射的  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  或  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  的红外光, 几乎全部透过外延层而抵达  $p$  型  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  衬底的耗尽区, 形成高量子产额的光伏型红外探测器。

衬底选用  $p$  型  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , 其中  $x$  值按探测器波长要求根据下列两式确定<sup>[6, 7]</sup>:

$$E_g = -0.302 + 1.93x + 5.35 \times 10^{-4}T(1-2x) - 0.180x^2 + 0.832x^3, \quad (2)$$

和

$$E_g = \frac{hc_0}{\lambda_c} = \frac{1.24}{\lambda_c} (\text{eV}), \quad (3)$$

式中  $\lambda_c$  是探测器的截止波长,  $E_g$  是衬底材料的禁带能量,  $h$  为普朗克常数,  $c_0$  为光速。(2)

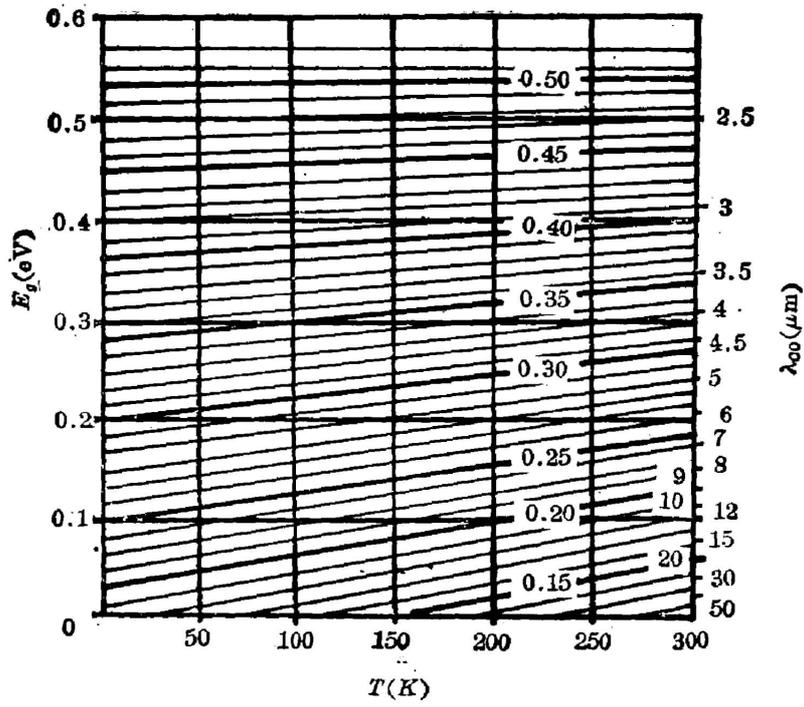


Fig. 2 Plot of energy gap versus temperature for different composition samples. The compositions listed are for the bold lines

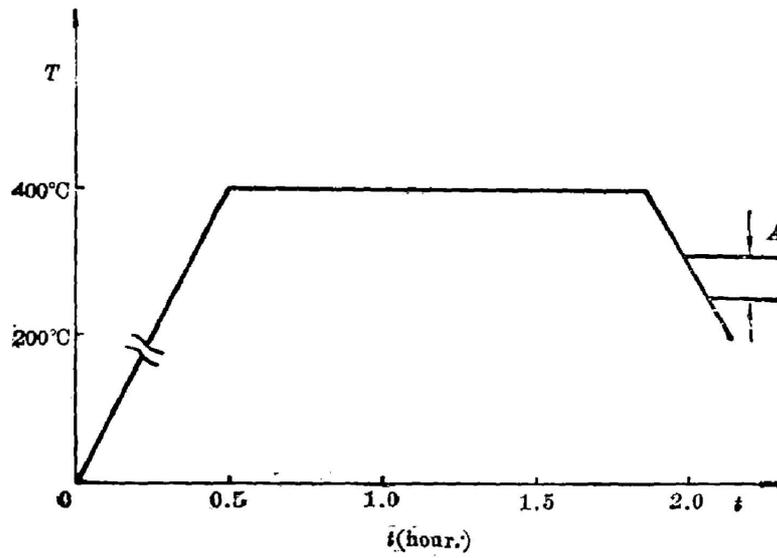


Fig. 3 Temperature variations of LPE  $n^+p$   $\text{InSb}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ . A. during growth

式是组分, 温度与禁带能隙之间的经验公式, 并从图 3 中不难看出  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料在红外探测方面的重要性以及它在这种异质结中所扮演的“角色”。

### 2. $n^+$ InSb/ $\text{PHg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 异质结的物理特性

图 4 给出  $n^+$ InSb 外延层表面形貌照片, 其表面光洁平整成镜面, 用干涉显微镜可以观察到波纹状的明暗相间细纹。

图 5 为 InTb/ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料解理面的 EDAX 扫描电镜分析结果, 外延层和衬底间的介面平直, 外延层厚度约为  $25\ \mu\text{m}$ , 它可通过源中 InSb 含量加以控制<sup>[4]</sup>。由于制备这种异质结时温度很低, InSb 与  $\text{HgCdTe}$  之间的互扩散很小。图 6 是用扫描电镜对有关元素的分析结果, 介面处组分变化陡峭, 过渡区小于  $3\ \mu\text{m}$ 。

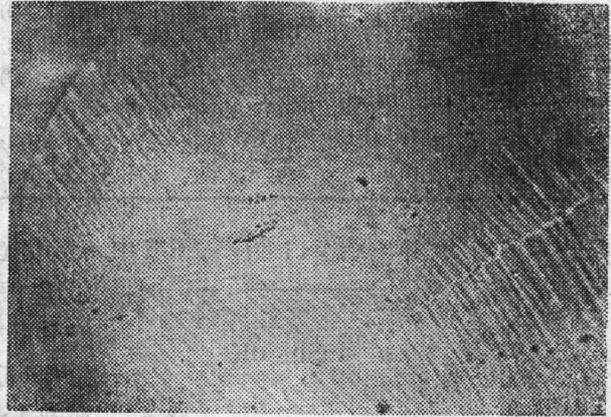


Fig. 4 Surface morphology of  $n^+$  InSb epitaxial layer ( $\times 500$ )

### 3. $n^+$ InSb/ $\text{PHg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 异质结的光学特性

#### (1) $n^+$ InSb/ $\text{PHg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 异质结探测器

将外延生长的  $n^+$ InSb/ $\text{PHg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  异质结片子, 经光刻、腐蚀并用 In 合金焊接金丝引线作电极, 制成红外探测器, 典型的器件参数列于表 2。

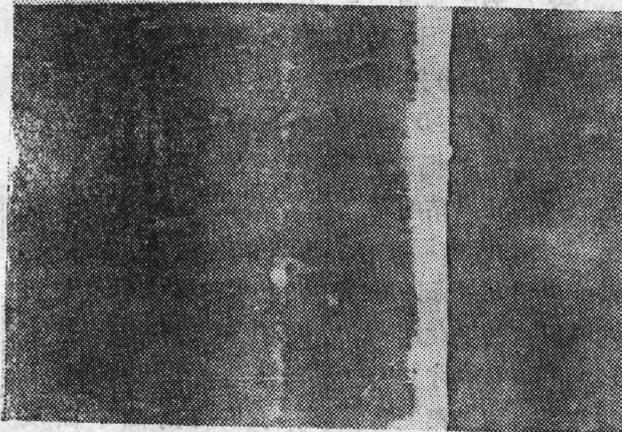


Fig. 5 Photograph of the cleavage facet of  $n^+-p$  InSb/ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  heterojunction ( $\times 1000$ )

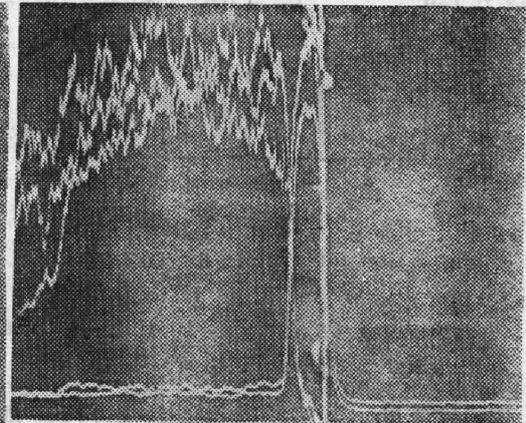


Fig. 6 Analysis of every element in InSb/ $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  heterojunction by SEM ( $\times 200$ )

left: substrate; middle: epitaxial layer; right: air

left: substrate; middle: epitaxial layer; right: air

#### (2) “窗口效应”

由方程(1)得知,  $n^+$ InSb 外延层具有伯斯坦-莫斯位移, 掺杂浓度改变, 引起材料短波一侧的吸收端移动, 如图 7 所示。由于衬底  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  中  $x$  值可变, 可选得使它的禁带宽度略小于或接近于外延层 InSb 的宽度, 当照射外延层的入射光子可自由通过该层, 到达界面而被吸收时就产生电子空穴, 并被异质结强电场扫过结面, 产生光生伏特效应, 这就

Table 2 Performance parameters of  $n^+p$  InSb/Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te heterojunction detectors

ser. No.	op. temp. K	zero bias resistance	$D_{\lambda_p}^*$ (cmHz <sup>1/2</sup> /W)	$\lambda_p$ ( $\mu$ m)
C7812-1	77	85.0(k $\Omega$ )	>1E10	3.4
	195	1.0(k $\Omega$ )	>5E8	3.2
C8207-2	77	4.2(k $\Omega$ )	>1E10	5.6
	195	0.5(k $\Omega$ )	>1E9	4.8
C8109-51	77	10.0(k $\Omega$ )	>1E10	5.0
C-2-3	77	0.5(k $\Omega$ )	>1E10	4.5
	295	0.1(k $\Omega$ )	>1E8	4.0
E10-1-2	77	0.1(k $\Omega$ )	>5E9	10.5

是通常所谓的“异质结窗口效应”，图8中 $\pi$ 形的光谱响应表现出这种效应。另一方面，在光照面，没有复合损耗影响器件性能，而体内复合损耗又是非常之小，所以，异质结器件性能优于扩散结(同质结)。图8a中，外延层浓度由 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 变到 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时，响应光谱短波端由 $3 \mu\text{m}$ 移到 $4 \mu\text{m}$ 附近，并使整个光谱成 $\pi$ 状； $x=0.2$ 的图8b，也具有滤波特性。所以，外延层掺杂浓度改变，短波一侧的吸收端也改变，这种“窗口效应”，被认为是该异质结的所谓第一种光谱位移所引起。

### (3) 响应光谱随 $x$ 和 $T$ 的位移

$n^+$ InSb/PHg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 异质结探测器的光谱响应，按  $x$  值分别示于图8(a, b)，当  $x=0.3$  时，响应波长在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段， $x=0.2$  时，则在  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  波段。把这种光谱随组分而位移的现象，称为这种异质结的第二种位移。由图8还可看出，器件的工作温度也影响着探测器的响应波长，谱线由  $A$  改变到  $B$ ，和由  $A'$  移到  $B'$ ，这就是能隙随温度的变化引起，由表1可以得知，只有 HgCdTe 材料才具有这种谱线位移，探测器的工

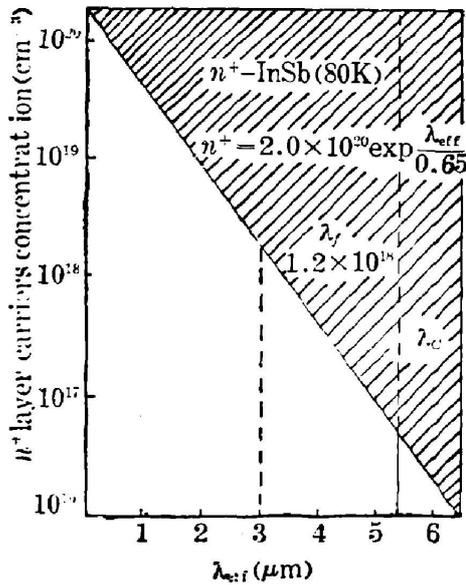


Fig. 7 Concentration of InSb  $n^+$  layer carriers vs. infrared transmissive wavelength (Area with tilted lines stands for transmissive region)

作温度下降，其响应波长向长波方向移动的特性，称为第三种位移。我们曾对图中曲线  $A \rightarrow B$  和  $A' \rightarrow B$  的移动，以及  $A \rightarrow A'$  和  $B \rightarrow B'$  的移动，用(2)式  $[E_g(x, T)]$  进行验证，理论与实验测得的结果符合很好。由此可以推断：第一，经验公式(2)对  $n^+$ InSb/PHg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 也适用；第二，由该异质结材料制得的探测器，所检出的信号是由 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 中产生的光生载流子，其  $n^+p$  结的耗尽区应该是在 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 的内部。

## 三、结 论

采用液相外延法来制备  $n^+$ InSb/PHgCdTe 异质结是 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 材料扩展应用和发

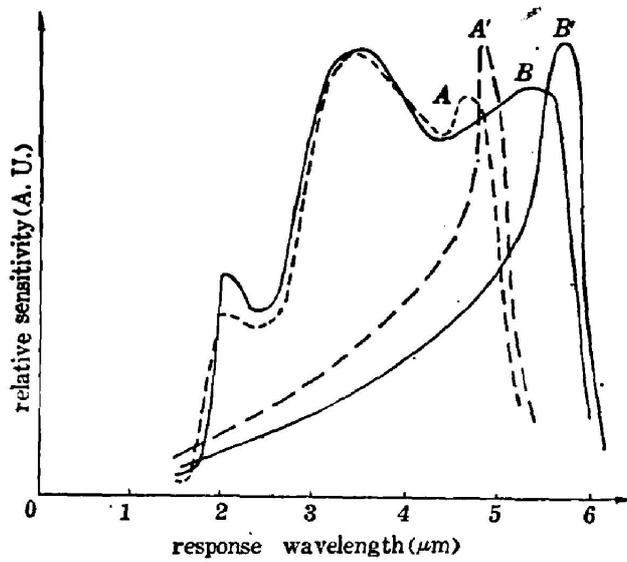


Fig. 8(a) Spectral response curves of  $\text{InSb}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  heterojunction detectors ( $x=0.3$ )  
dotted line: measured at room temperature solid line: measured at 77 K

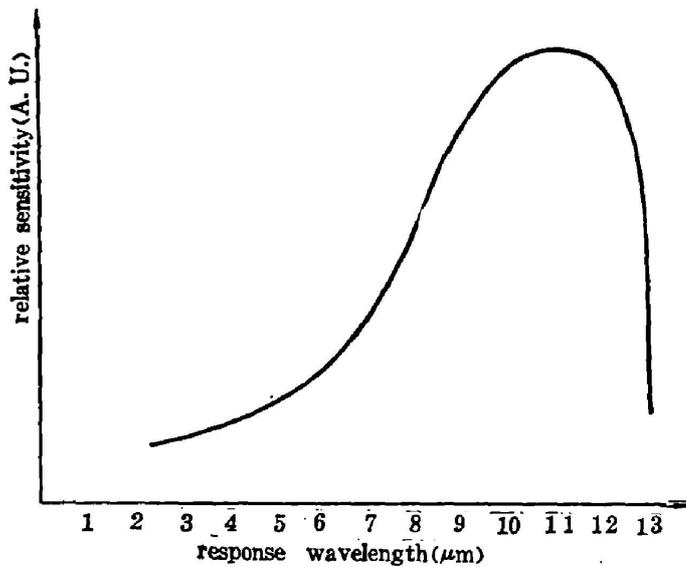


Fig. 8(b) Spectral response curves of a  $\text{InSb}/\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  heterojunction  
detector ( $x \approx 0.2$ ) OP. temp.: 77K

展的重要方面,同时由于其制备温度极低,除工艺上的方便之外,致使该异质结的优点更为突出:诸如它是较为理想的异质结,光激发载流子获得限制,表面复合对器件影响降低, $n^+$ 层掺杂程度能够控制和选择、衬底组分变化范围很大……;另一方面, $n^+\text{InSb}$ 可视作体 $\text{HgCdTe}$ 的纯化膜,可防汞外逸和避免表面漏电流等。给该异质结及其红外探测器作估价,目前还为时过早,不过就已有的工作来看,它跟得上红外列阵及红外 CCD 器件对异质结材料提出的基本要求,可望成为一种有前途的红外材料。

参加本工作的还有张光华、陈羽、何永成等同志。

本工作用的 HgCdTe 衬底材料为我所 MCT 小组提供, 零件制备及性能测试得到王玉琴、冯文清、顾伯奇、张绍举和陈淑英等同志的帮助, 电镜分析得到李萍、徐晓华、王昭云等同志的帮助, 与宋炳文同志的讨论对完成本工作得益非浅, 一并致以谢意。

### 参 考 文 献

- [1] A. H. Lockwood *et al.*; *Optical Eng.*, 1983, **22**, No. 4 (Jw/Aug) 505.
- [2] K. J. Riley, A. H. Lockwood; *Proc. SPIE*, 1980, 217, 206.
- [3] 吴长树, 李织;《物理》, 1982, **11**, No. 3 (Mar), 154.
- [4] 宫尾巨, 长坂浩生;《应用物理》, 1975, **44**, No. 7 (Jul), 826.
- [5] O. V. Kosogova, M. A. Waramazina; *Soviet Phys. Semiconductors*, 1968, **28**, No. 1 (Jan), 54.
- [6] J. L. Schmit; *J. Crystal Growth*, 1983, **65**, No. 1 (Jan), 249.
- [7] D. Long, J. L. Schmit; *Semiconductor and Semimetals* (R. K. Willardson and A. C. Beer Editors), (Academic Press, New York, 1970), **5**, 234.

## LPE growth of $n^+ \text{InSb} / \text{P} \text{Hg}_{1-x} \text{Cd}_x \text{Te}$ heterojunction

WU CHANGSHU AND LI CHI

(*Kunming Institute of Physics*)

(Received 22 January 1985; revised 23 December 1985)

### Abstract

This paper describes an  $n^+ - p$  InSb/Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te heterojunction prepared by using liquid-phase epitaxial method. The growing system used consists of a horizontal slider boat in the open-tube filled with H<sub>2</sub>. Growth temperature is between 300~400°C and cooling rate is slower than 8°C/min. The grown film has a mirror-like surface with a thickness of 15~25 μm. EDAX-SEM analysis shows that the interface between layer and substrate is straight and the compositional transition is very sharp. Infrared detectors of both 3~5 μm and 8~14 μm can be made of this material. The response wavelength of the detector depends upon the  $x$  value in Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te ( $x \approx 0.3$  for  $\lambda \approx 3 \sim 5 \mu\text{m}$  while  $x \approx 0.2$  for  $\lambda \approx 8 \sim 14 \mu\text{m}$ ). For a detector element about 1mm in diameter,  $D^*_{10} \geq 1 \text{ E}10 \text{ cm Hz}^{1/2} / \text{W}$  at 77 K (3~5 μm),  $R_0 > 10 \text{ k}\Omega$ . Therefore, this new material is also a prominent candidate for infrared focal plane arrays.