

PbTe/PbSnTe 异质结红外探测器

张素英 陈泉森 贡树行 乔怡敏 余中和

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文用液相外延方法制备异质 n/p 结构 $n\text{-PbTe}/p\text{-PbSnTe}/p^+\text{-PbSnTe}$ 外延片。衬底为汽相法生长的 PbSnTe, 晶向为 (100), 外延生长温度为 $520^\circ\sim 550^\circ\text{C}$ 。在纯净氢气氛下长出平整无沾铅的外延片。用台面二极管工艺制备红外探测器, 在 77 K 下, 十元线列的平均性能分别为 $D_{10\mu\text{m}}^* = 1.94 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, $R_{bb}^* = 1.2 \times 10^3 \text{ V/W}$, $R_0A = 0.25 \Omega \text{ cm}^2$, $\lambda_c = 11.6 \pm 0.1 \mu\text{m}$ 。小光点试验和电学测量表明: 电学和光学串音可忽略不计。单元器件 D_λ^* 最大达 $2.91 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, R_0A 最大达 $3.4 \Omega \text{ cm}^2$ 。噪声频谱测试表明: $1/f$ 拐点处的频率可低至 $30\sim 40 \text{ Hz}$ 。

一、引言

PbTe/PbSnTe 异质结红外探测器是一种光生伏特型探测器。由于两种异质材料导电类型不同而产生载流子扩散, 从而形成一个内建场, 这就构成了一个异质 $n-p$ 结空间电荷区。异质材料禁带宽度的差异, 对空间电荷区的宽度和内建场大小有一定影响。和同质 $n-p$ 结一样, 在异质 $n-p$ 结附近, 一个少子扩散长度范围内所产生的光生电子-空穴对中的少子扩散到空间电荷区边, 被内建场扫向结区对面一侧, 产生光生电动势。这就是说, 异质 PbTe/PbSnTe $n-p$ 结对红外辐射的探测机理和同质 $n-p$ 结相同, 都是光生伏特效应^[1]。本器件具有下列特点: (1) 多元列阵各光敏面之间的截止波长 λ_c 一致性好。(2) 长波辐射从宽禁带的 PbTe 一面入射, 长波光电转换效率与结深无关; 多元列阵各光敏元之间的灵敏度一致性好。(3) 避免了同质结在结深时信号辐射在表面层的吸收损失, 以及结浅时表面复合和薄层电阻的影响, 因而异质结光电转换效率有可能比同质结高。(4) 表面层宽能隙的 PbTe 滤去了 $6 \mu\text{m}$ 以下的短波辐射, 从而具有短波自滤波作用。

二、PbTe/PbSnTe 异质结的制备工艺

1. PbSnTe/PbTe 薄层的液相外延

我们的 PbTe/PbSnTe 异质结器件的衬底是用闭管汽相生长的 P 型 PbSnTe 单晶, 组

本文 1983 年 12 月 30 日收到。

分 $x=0.20$, 载流子浓度约 10^{19} cm^{-3} 。为了避免 $p-n$ 结向 PbTe 一侧位移及 Moss-Burstein 效应引起的长波限变短的不良影响, 在衬底上先外延一层低浓度的 P 型 PbSnTe, 再外延 n 型 PbTe, 而构成异质结。8~14 μm 探测器光生载流子的激活区就处在这一层外延的 PbSnTe 层内。

为获得平整的外延层, 衬底选用(100)面, 偏差小于 0.5° 。生长面采用化学机械抛光, 外延生长前并增加去损伤工艺。为避免岛状生长和减少沾铅现象, 对外延系统进行了改进, 见图 1。

通过高纯氢气的石英管置于精密控温的三段电阻炉中, 样品放在多孔石墨舟的一槽中。将配好的母液依次倒入石墨舟的推块孔内, 外延时先后置于衬底上降温生长。控制外延温度和时间获得所需要的外延层和异质结。

为减少由衬底延伸到外延层的缺陷, 外延 PbSnTe 第一层做得比较厚, 并在外延生长前后进行长时间的退火, 使异质结中晶格失配区的严重应力得到减弱, 使衬底的载流子浓度得到降低, 避免了 $n-p$ 结向宽禁带 PbTe 侧位移, 也有利于长波量子效率的提高。

2. 异质结台面二极管制备工艺

我们研究了异质结的缺陷、位错, 特别是工艺损伤对器件性能的影响^[2], 通过对光刻、腐蚀等工艺条件的试验及器件表面问题的初步探索, 我们对以往的台面二极管的制备工艺作了较大的改进, 改善了器件性能, 获得了光滑边缘、无钻孔的各种光敏面及列阵器件。

改进后的探测器制备工艺过程如下:

检测型号强弱 → 分片(拉丝切片) → 光刻(非接触式) → 腐蚀台面 → 清洗(圆底坩埚) → 下电极(用 In 将基片烧焊到银底座上) → 上电极(热针焊接) → 表面保护 → 装管 → 测试。

光刻后, 先用 Norr 电解液小电流蚀刻出光敏面的图形, 再用化学法腐蚀达到衬底层, 由于 n 型光敏面四周是高浓度 p 型, 不大可能表面反型。另外对 PbSnTe, $\frac{\mu_e}{\mu_h} \approx 1$, 不存在类似于 InSb 丹培效应而引起的光照反型。所以目前采用的结构和工艺不会因为表面反型或光照反型而造成光敏面扩大, 这一点已由多元列阵的小光点试验所证实。上下电极的制备中注意到蒸发温度低于 180°C , 并用小压力短时间的焊接工艺避免了损伤对器件性能的影响。表面保护层是提高器件性能和稳定性的重要环节, 除蒸抗反射层 ZnS 外, 我们发现经一定的电解处理或化学试剂的浸泡, 有时也能达到同样效果。

三、探测器性能

我们制备的探测器工作于 77 K, 光敏面直径为 0.3~1.2 mm, 封管在玻璃杜瓦瓶中, 液氮贮存时间大于 3 小时。一批元件性能列于表 1, 对其典型性能分述如下。

1. 分谱响应

各个元件的分谱探测率曲线十分相似, 见图 2。控制外延条件, 我们的器件长波限 $\lambda_0 = 11.5 \pm 0.2 \mu\text{m}$, 峰值波长在 $10 \mu\text{m}$ 附近。

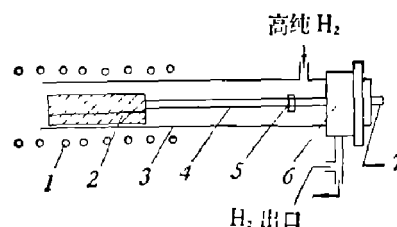


图 1 液相外延生长系统

- 1—三段电阻炉; 2—石墨舟;
- 3—石英管; 4—石英推棒;
- 5—夹头; 6—威尔逊活塞;
- 7—不锈钢棒

表 1 元件性能参数表

元件 编号 参 数	LD-3 ¹⁾	07(5)	LD(3/3)	98(A)	06(9)	97(79)	128(3)
D_{λ}^* ($10^{10} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$)	1.94	2.23	2.91	1.98	2.61	2.30	2.57
R_{bb}^* (V/W)	1.2×10^3	1748	1960	839	961	794	1230
$R_0 A$ (Ωcm^2)	0.25	3.4	0.32	2.0	1.0	0.9	5.4
λ_c (μm)	11.6	11.7	11.6	11.6	11.6	11.6	11.4

1) 为十元线列的平均值

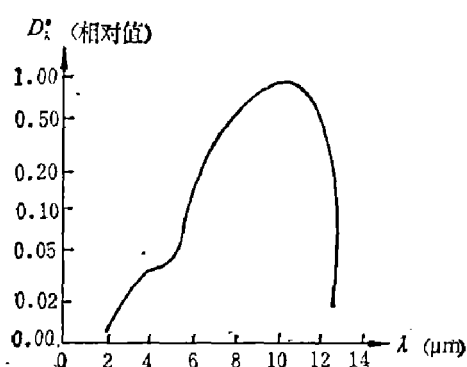


图 2 异质结红外探测器的光谱分布

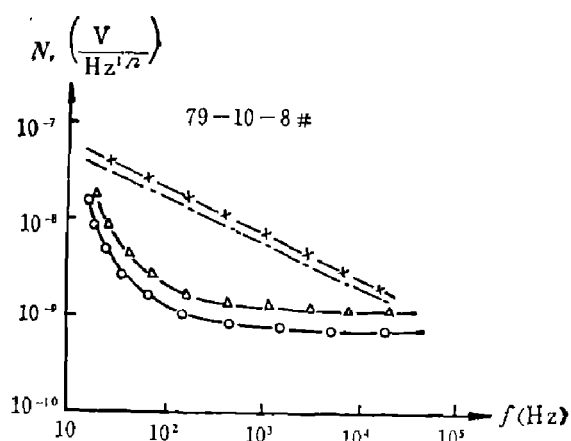


图 3 异质结红外探测器的噪声频谱(79—10)

○—偏流 0.05 mA; △—偏流 0.56 mA;
●—偏流 1.0 mA; +—偏流 2.0 mA

2. 异质结构的噪声频谱

噪声频谱如图 3 所示。当小偏流工作时，在通常用于测试的 800 Hz 频率上，单位带宽的噪声电压低于 $10^{-9} \text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 。元件在最佳工作状态的偏置电流是微安量级，其单位带宽的噪声电压在 $10^{-9} \text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 和 $10^{-8} \text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ 之间。噪声拐点处的频率，当零偏压时可低达 30~40 Hz。

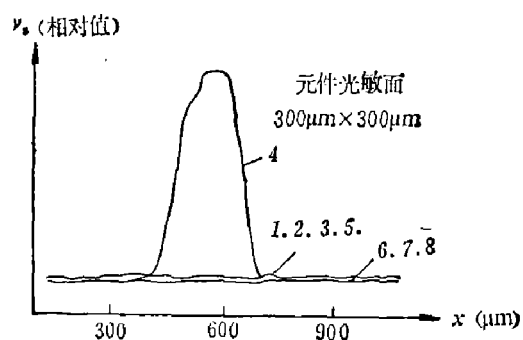


图 4 八元阵列一维小光点扫描的响应图

3. 光敏面

(1) 电学测量。在某一探测元(设第 j 个)两端施加一恒流电源，其电流大小 I 与实际的由光辐射而产生的光电流信号相当。用放大器测量 1 至 n 个元件两端的串音信号电压 V_{jk} ，对几只 8~10 元阵列进行了电学测量，结果为：

$$V_{jk} \begin{cases} = 0 & (j \neq k); \\ \approx IR_j & (j = k). \end{cases}$$

(2) 光学测量。采用反射式光学系统，光源(溴钨灯)发光光谱为 $0.5 \sim 4 \mu\text{m}$ ，光学系统聚焦成直径约 $50 \mu\text{m}$ 的光点，投射到八元阵列器件的 4 号光敏面上。垂直线列方向作一维扫描，画出 V_i 与位置 x 的关系曲线，见图 4。中间的峰即为 4 号光敏面的响应曲线。其它七个元件的响应是接近噪声水平的水平线。可见其余元件无信号输出。多元阵列封管在

具有透明窗口(ZnSe, 透过率大于 80%)的杜瓦瓶中, 进行一维或二维响应分布测试, 几只列阵元件测试的结果表明, 整个元件光敏面响应分布比较均匀, 测量的光敏面积等于或略小于标称的光敏面积。

综上所述, 我们用闭管汽相法生长的 PbSnTe 均质单晶做衬底, 液相外延制备 PbTe/PbSnTe 异质结, 用计算机模拟工艺条件找到了控制响应长波限的工艺因素, 解决了器件工艺损伤问题。制备的单元长波器件 $D_{10\mu\text{m}}^*$ 最大达 $2.91 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, R_0A 最大达 $3.4 \Omega\text{cm}^2$, 并研制出 $\bar{D}_{10\mu\text{m}}^* = 1.94 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 的十元线性列阵。多元列阵器件的小光点试验表明, 我们研制的 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 探测器无光敏面扩大, 亦未见有电学串音效应。目前研制出的一定数量的探测器, 已用于红外扫描仪及医用热象仪上, 并摄出较清晰的照片和图象。连续使用三年多, 至今工作稳定, 性能良好。

致谢——本工作得到原一室有关同志帮助, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 汤定元, 红外物理与技术, (1976) 4/5: 62~67.
- [2] 张素英等, 红外物理与技术, (1981), 6: 1~6.

PbTe/PbSnTe HETEROJUNCTION INFRARED DETECTOR

ZHANG SUYING, CHEN QUANSEN, GONG SHUXING,
QIAO YIMIN, YU ZHONGHE
(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The PbTe/PbSnTe heterojunction has been made by LPE technique on the p^+ -PbSnTe $\langle 100 \rangle$ substrates which are grown by closed-tube vapor transport technique. The mirror-like LPE wafers without residual melt are grown at temperatures of 550° to 520°C in pure hydrogen ambient. Mesa diode technology has been improved giving ten-element detectors which have average detectivity of $1.9 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, responsivity of $1.2 \times 10^3 \text{ V/W}$, zero-bias resistance-area product of $0.25 \Omega\text{cm}^2$, cut-off wavelength of $11.5 \pm 0.2 \mu\text{m}$ at 77 K. Spot scan and electrical measurements indicated that electrical and optical cross-talk can be neglected and $1/f$ noise roll-off frequency is (30~40) Hz. For single-element detectors, the maximum values of D_λ^* and R_0A are $2.91 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ and $3.4 \Omega\text{cm}$ at 77K respectively.