

InAsPSb/InAs 中红外光电探测器*

张永刚 周 平 单宏坤 潘慧珍

(中国科学院上海冶金研究所微电子学分部, 上海, 200233)

1991年7月13日收到, 同年11月1日修改定稿

本文报告了采用外延工艺研制的 InAsPSb/InAs 中红外 ($1\text{--}3.2\mu\text{m}$) 光电探测器。该器件为台面型结构, 响应波长与氟化物光纤的低损耗窗口相匹配, 在室温零偏压条件下峰值探测率达 $4 \times 10^9 \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$, 瞬态响应时间为 1.2 ns(FWHM) 。

EEACC: 7230C, 2520D

一、引言

氟化物光纤在中红外 ($2\text{--}4\mu\text{m}$) 波段的超低损耗特性已引起了人们的广泛兴趣, 为此近年来人们已致力于研究用于此波段的光电器件, 如激光器、探测器等并已取得相当进展, 此波段的器件在光学测量、传感器等方面也有广泛应用。可用于此波段的半导体材料有 II-VI、IV-VI、III-V 族等, III-V 族材料由于其易于控制外延生长, 掺杂特性好以及器件速度高等优点, 是人们优先考虑的材料。

在 III-V 族半导体中, 可工作于 $2\text{--}4\mu\text{m}$ 波段的有与 InAs 或 GaSb 衬底晶格匹配的 GaInAsSb、AlInAsSb 及 InAsPSb 等四元系晶格匹配系统及其它晶格失配系统。对于目前经常采用的平衡外延生长如 LPE, 晶格匹配的 GaInAsSb 体系因存在不混熔区而无法生长波长大于 $2.3\mu\text{m}$ 的材料, AlInAsSb 体系则因存在 Al 的急剧分凝而难以制得组份均匀的材料, 较理想的是与 InAs 衬底晶格匹配的 InAsPSb 四元系^[1-3], 此材料体系在室温下的实际带隙可调范围为 $0.32\text{--}0.56\text{ eV}$, 对应的波长为 $2.2\text{--}3.5\mu\text{m}$, 可以满足此波段的器件要求。本文报道了我们采用液相外延工艺研制的 InAsPSb/InAs 中红外光电探测器, 器件的响应波长为 $1\text{--}3.2\mu\text{m}$, 具有较高的响应度和工作速度, 且适合于室温运用。

二、器件设计

探测器设计中最基本的要求是要器件有尽量高的响应度和较低的噪声(暗电流和结电容), 为此首先需调整探测器材料的带隙使之对应的波长略大于所需探测光的波长, 由

* 国家自然科学基金资助课题。

于氟化物光纤的低损耗窗口在 $2.5\mu\text{m}$ 附近,为此我们选取 InAsPSb 的带隙波长为 $2.7\mu\text{m}$ 左右,对应的禁带宽度约为 0.46eV ($T = 300\text{K}$)。

图 1 中示出了 InAsPSb 四元系的组份相图^[1,2],此四元系可以看成是由 InAs, InP 和 InSb 三个二元系组成的混晶,调节其组份可使其晶格常数和带隙在一定范围内变化,与 InAs 衬底晶格匹配的 $\text{InAs}_{1-x-y}\text{P}_x\text{Sb}_y$ 的组份与带隙的关系可由下式表示:

$$E_g(\text{InAs}_{1-x-y}\text{P}_x\text{Sb}_y) = (1 - x - y)E_g(\text{InAs}) + xE_g(\text{InP}) + yE_g(\text{InSb}) \\ - x(1 - x - y)C_1 - y(1 - x - y)C_2 - xyC_3.$$

且组份满足

$$y = 0.47x \quad (x + y \leq 1)$$

式中 $C_1 = 0.1\text{eV}$, $C_2 = 0.61\text{eV}$, $C_3 = 1.6\text{eV}$ 分别为 InAsP, InAsSb 和 InPSSb 三元系的能带弯曲参数。

由上式可以计算出所需波长材料的固相组份,在液相外延生长中需选择合适的母液组份及生长温度使之生长出固相组份合适的晶格匹配外延层^[3]。

我们的探测器选用了常规的台面型 PIN 结构,其剖面如图 2 所示。除材料的带隙外,影响该探测器的响应度和暗电流的主要因素是 n-InAsPSb 光吸收层的厚度和载流子浓度,一般要求此层的厚度要大于 InAsPSb 材料对中红外光的有效吸收长度 ($\sim 1\mu\text{m}$),以保证一定的量子效率,而此层的载流子浓度应尽量低,这是因为:对 InAsPSb 材料,由于其禁带宽度 E_g 较小,经对构成探测器暗电流的主要成份扩散电流、产生-复合电流及隧道电流进行分析估算得出,在我们感兴趣的范围内隧道电流起主要作用,击穿电压也主要由隧道机制控制,降低该层的载流子浓度有利于抑制隧道电流,低载流子浓度对减小探

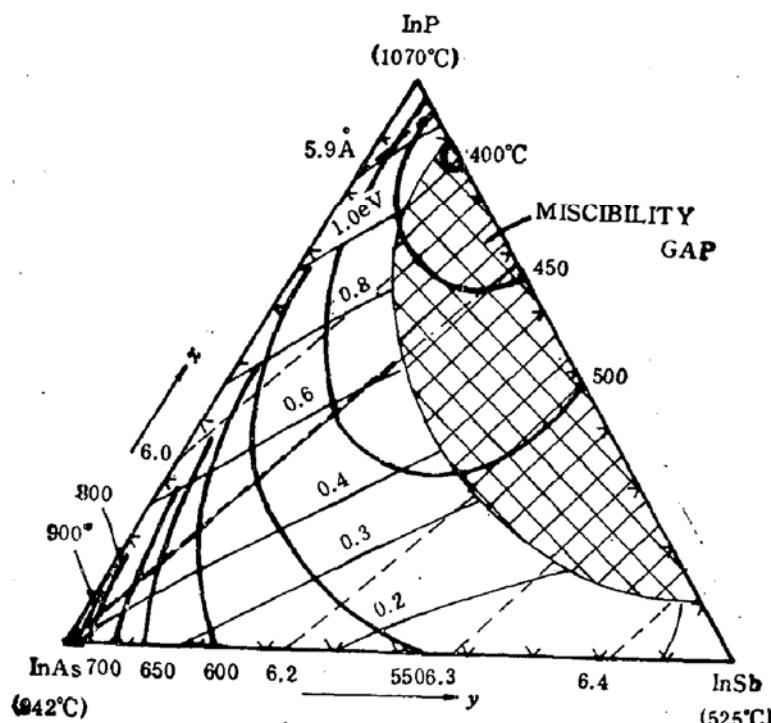


图 1 $\text{InAs}_{1-x-y}\text{P}_x\text{Sb}_y$ 四元系的组份相图

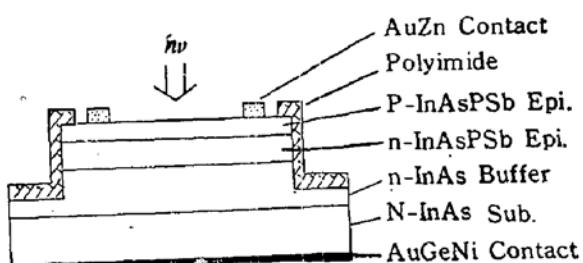


图 2 InAsPSb/InAs 中红外光电探测器结构示意图

测器的结电容,提高工作速度也有利。此外,浅结器件有利于探测器工作速度的提高,为此我们选择 P-InAsPSb 层的厚度约为 $1\mu\text{m}$.

三、器件制作

采用 LEC 法生长的掺 Te(100)InAs 单晶做为衬底材料,用 0.5% 溴甲醇溶液对其进行化学-机械抛光以获得镜面表面,经腐蚀清洗后在常规的滑移石墨丹系统中进行液相外延。用过冷法依次生长非故意掺杂的 n-InAs 缓冲层 ($>1\mu\text{m}$)、非故意掺杂的 n-InAsPSb 层 ($\sim 2\mu\text{m}$)、掺 Zn 的 P-InAsPSb 层 ($\sim 1\mu\text{m}$), 采用的生长母液由 6NIn, 6NSb 和纯度 InAs、InP 单晶经精确称重配制,母液在 640°C 下保持 45 分钟以使源充分溶解,然后降温至 595°C 开始外延生长,生长时母液的过冷度约为 5°C , 降温速率为 $0.7^\circ\text{C}/\text{min}$, 生长 P 型层的母液中掺入原子分数为 4×10^{-3} 的高纯 Zn。

生长好的外延片采用常规的光刻和湿法腐蚀工艺制作台面结构, 我们制作了两种不同尺寸的台面, 一是 $400 \times 400\mu\text{m}$ 方形, 一是直径 $100\mu\text{m}$ 圆形, 以满足不同要求, 然后分别制作 P 面和 N 面欧姆接触电极, 并采用聚酰亚胺进行表面钝化, 最后进行封装测试。为适应不同的器件工作温度, 我们选用了三种形式的封装, 即室温普通光电管壳封装, 一级热电制冷器封装和液氮杜瓦瓶封装。

四、结果与讨论

对 LPE 生长的 InAsPSb 四元合金材料进行了系统的表面形貌与双晶衍射分析^[4], 结果表明: 外延片的表面形貌与其母液组份及晶格失配度有确定的依赖关系, 据此我们可以方便地确定合适的母液组份。在前述生长条件下, 我们选取母液中 As、P、Sb 的原子分数为 0.018, 0.00080 和 0.349, 室温下的晶格失配约 $+0.1\%$, 此时外延层的质量为最佳, 材料的固相组份为 $x = 0.2$, $y = 0.09$, 波长符合要求。图 3 中示出了外延片的电化学 C-V 载流子浓度剖面分布的测试结果, 由图可见, 各层的浓度厚度均满足设计要求。

图 4 为探测器在室温及 77K 下的典型 I-V 特性曲线 (台面 $400 \times 400\mu\text{m}$), 由图可见: 室温下探测器的反向击穿电压大于 1V , 暗电流约 $5\mu\text{A}$ ($V_b = -0.5\text{V}$)。在 77K 下, 探测器的暗电流明显减小, 反向击穿电压和正向开启电压均有所增加(图版 1)。

采用由能斯特灯光源、调制盘、棱镜单色仪, 热释电探测器及锁相放大器等构成的光

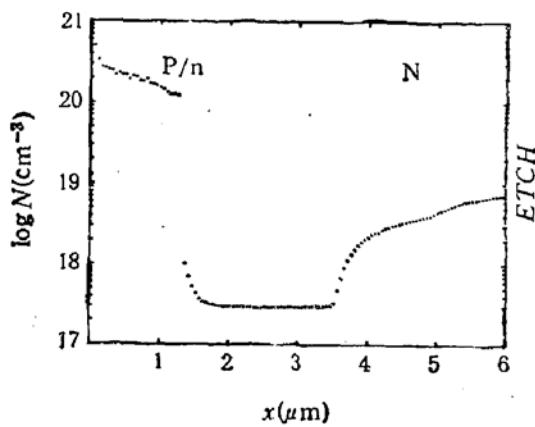


图 3 外延片的纵向载流子浓度分布剖面

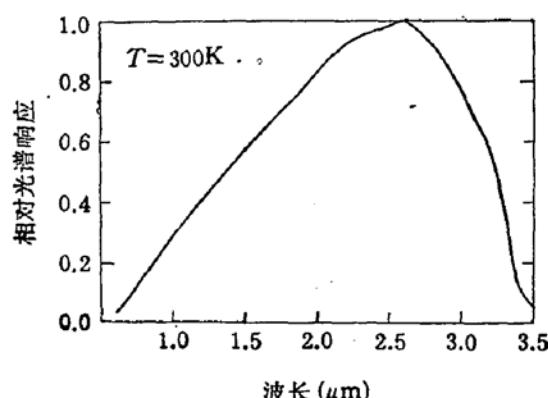


图 5 InAsPSb/InAs 中红外光电探测器的相对光谱响应

谱响应测试系统对探测器的光谱响应进行了测试, 图 5 示出了探测器在室温下典型的相对光谱响应曲线, 其响应波长范围约 $1.0\text{--}3.2\mu\text{m}$, 峰值响应波长为 $2.6\mu\text{m}$, 符合我们的要求。光谱响应在长波方向上截止得较慢, 这是由于 LPE 生长中 P 的耗尽引起外延层组份向长波方向变化以及 InAs 缓冲层引起的。77K 下探测器的相对光谱响应曲线形状与室温下基本相同, 只是峰值略向短波方向移动(峰值波长约为 $2.4\mu\text{m}$)。

采用由 1000K 标准黑体辐射源, 调制盘及锁相放大器等构成的黑体响应测试系统对探测器的黑体响应度及探测率进行了测试, 表 1 中列出了对若干器件在不同温度下的测试结果。由表可见, 室温下探测器的黑体探测率约为 $1 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ (1000K, 1kHz, 1Hz), 对应的峰值探测率可大于 $4 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 与室温相比采用一级热电制冷后(降温 $\sim 30\text{K}$), 探测器的响应度可提高 3 倍, 探测率可提高 2 倍; 采用液氮致冷则探测器的响应度可提高 15 倍, 探测率提高 6 倍以上。

表 1 InAsPSb/InAs 探测器测试结果

器件编号	封装形式	黑体响应度 $R(1000\text{K}, 1\text{kHz})$ V/W	黑体探测率 $D^*(1000\text{K}, 1\text{kHz}, 1\text{Hz})$ $\times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$	峰值探测率 $D^*(\lambda, 1\text{kHz}, 1\text{Hz})$ $\times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$
893609-P	普通光 电管壳	88.9(295K)	1.24(295K)	4.86(295K)
893610-P	普通光 电管壳	80.1(295K)	1.06(295K)	4.29(295K)
893611-P	普通光 电管壳	75.8(295K)	0.97(295K)	4.01(295K)
893601-TE	加热电致冷 器(一级)	228($\sim 260\text{K}$) 73.6(295K)	2.07($\sim 260\text{K}$) 0.92(295K)	6.44($\sim 260\text{K}$) 3.86(295K)
893601-DW	侧窗杜 瓦瓶	1114(77K) 72.3(295K)	6.41(77K) 0.74(295K)	21.3(77K) 3.31(295K)
893602-DW	侧窗杜 瓦瓶	1220(77K) 83.5(295K)	6.68(77K) 0.86(295K)	22.6(77K) 3.67(295K)

图 6 示出了探测器在波长 $1.3\mu\text{m}$ 的高斯光脉冲 ($\text{FWHM} = 80\text{ps}$) 作用下的瞬态响应, 探测器的台面直径为 $100\mu\text{m}$, 由高速取样示波器测量输出信号。由图可见, 室温零偏压下探测器的响应速度 (FWHM) 约为 1.2ns , 可以满足高速光通信的要求。

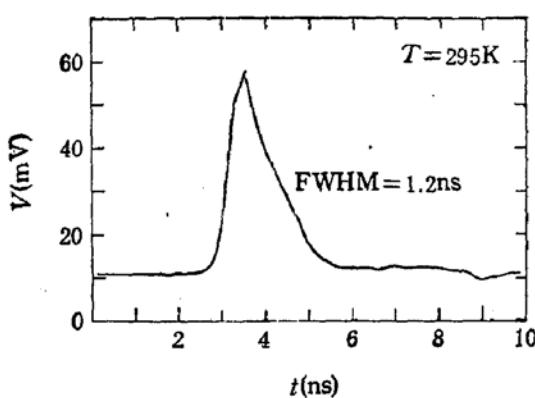


图 6 InAsPSb/InAs 中红外光电探测器的瞬态响应

五、结 论

1. InAsPSb/InAs 是理想的中红外探测器材料, 用此材料已制得室温零偏压下响应速度为 1.2ns 的探测器, 可以满足高速光通信的要求。此探测器特别适合于室温及热电致冷条件下运用。

2. 已制得的探测器的响应波长为 1—3.2 μm , 峰值响应波长为 2.6 μm , 与氟化物光纤的低损耗窗口相符合。室温下探测器的峰值探测率大于 $4 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。

3. 在液相外延工艺中阐明了 InAsPSb/InAs 体系外延层表面形貌与母液组份及晶格失配等的关系, 提高了外延片的质量, 尚需进一步降低本底浓度, 改善组份渐变及增加抗反射镀层等以进一步提高器件性能。

在器件测试中得到中科院上海技物所童裴明, 杨秀珍, 王戎兴等的帮助, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] Naoki Kobayashi and Yoshiji Horikoshi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**, 2301 (1981).
- [2] Takashi Fukui and Yoshiji Horikoshi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**, 587 (1981).
- [3] R. A. Garnham, M. D. Learmonth, J. J. Rimington, A. S. M. Ali, M. J. Robertson and W. A. Stallard, *Electron. Lett.*, **24**, 1416 (1988).
- [4] Zhang Yonggang, Zhou Ping, Chen Huiying and Pan Huizhen, *Rare Metals*, **9**, 46 (1990).

InAsPSb/InAs Mid-Infrared Photodetectors

Zhang Yonggang, Zhou Ping, Shan Hongkun and Pan Huizhen

(Microelectronics Branch, Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica, Shanghai, 200233)

Abstract

The fabrication and characterization of epitaxial InAsPSb/InAs mid-infrared ($1\text{--}3.2\mu\text{m}$) photodetectors optimised for room temperature operation at the low loss wavelength window of fluoride fibre is reported. Detectivity of $4\times 10^9 \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ at $2.6\mu\text{m}$ and transient response time of 1.2 nS(FWHM) at zero bias have been achieved at room temperature on the photodetectors with PIN mesa structure.

EEACC: 7230C, 2520D