

# 场助 InGaAsP/InP 异质结 半导体光电阴极的研究

李晋闽\* 郭里辉 侯 洵 王存让 张工力  
(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

## 提 要

本文通过对 InGaAsP/InP 场助异质结半导体光电阴极的材料生长、场助肖特基结的制备及阴极激活等工艺的系统研究, 研制出具有较高光谱响应的半导体光电阴极, 生长出优于文献报道的晶格失配率标准的材料, 得到相当 80 年代国际水平理想因子值的场助肖特基结, 用实验数据介绍提高量子效率数量级的方法和条件。研究结果表明场助异质半导体光电阴极是在红外波段很有潜力的光电发射体。

关键词: 场助阴极, InGaAsP/InP 异质结构。

## 一、引 言

虽然具有 GaAs 负电子亲和势 NEA (Negative Electron Affinity) 半导体光电阴极的第三代像增强器和光电倍增管已进入实用阶段<sup>[1,2]</sup>, 但 GaAs NEA 光电阴极的响应波长范围小于  $0.9 \mu\text{m}$ , 使得在不少领域(如军用被动式夜视器件的等)应用中受到限制。而场助半导体光电阴极的阈值可延伸到  $1.1 \mu\text{m}$  以上, 系目前在红外波段最成功的光电发射体<sup>[3,4]</sup>。此前, 国内尚无较长波长响应的半导体光电阴极, 仍沿用传统的 Ag-O-Cs(S-1) 阴极应用于红外波段的像增强器。

本文报道波长响应为  $1.25 \mu\text{m}$  的场助 InGaAsP/InP 异质结半导体光电阴极的研究结果<sup>[5]</sup>, 利用液相外延技术在 p-InP 衬底上生长出良好质量的 InGaAsP/InP 异质结光电阴极材料, 在超高真空系统内得到了理想因子最佳值为 1.08 的场助肖特基结, 依据测试结果加以讨论并给出结论。

## 二、实 验

图 1 为场助 InGaAsP/InP 半导体光电阴极有无偏压时的能带结构。p-InGaAsP 是满足波长设计要求的有源层, 表面有一层与其形成肖特基结的银膜, 场助偏压通过衬底背面与银膜表面加在肖特基上, 在有源层表面形成耗尽区。有源层受到光照射时, 体内产生的光电子在向表面的输运中受到耗尽区电场的作用, 由较低能级  $I'$  能谷跃迁到高能级  $L$  能谷中, 最后穿过银膜和 Cs-O 层发射到真空中。

### 1. 场助 InGaAsP/InP 光电阴极的材料结构

材料结构如图 2 所示, 所用衬底为掺 Zn 的 (100)p 型 InP。先在 InP 衬底上生长一层

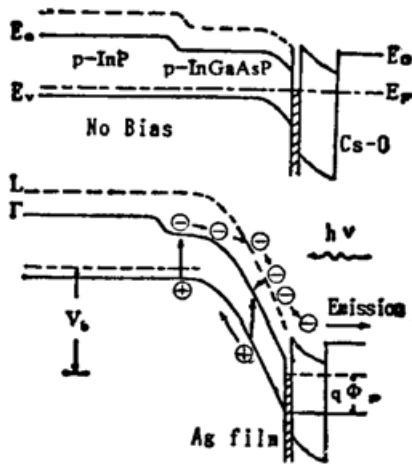


Fig. 1 Schematic energy-band diagram for an InGaAsP/InP heterojunction photocathode

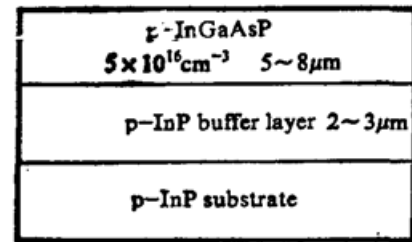


Fig. 2 Material structure of InGaAsP/InP photocathode

厚约为 4~8  $\mu\text{m}$  的 p 型 InP 缓冲层, 以减少衬底在加工时受机械、化学因素造成表面缺陷及损伤而影响 InP 外延层。由于是单异质结构的光电阴极, 表面  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  有源层中的组分  $x, y$ , 应同时满足该层的晶格常数与 InP 缓冲层相匹配且带隙符合设计波长的要求。

本文研究的阈值波长为 1.25  $\mu\text{m}$  的场助光电阴极, 有源层的带隙应为 0.99 eV。能隙  $E_g$ 、晶格常数  $a$  与组分  $x, y$  的关系式为<sup>[6]</sup>

$$E_g(y) = 1.35 - 0.72y + 0.12y^2, \quad (1)$$

$$a(x, y) = 0.1894y - 0.4184x + 0.013xy + a(\text{InP}) \quad (2)$$

式中,  $a(x, y)$  与  $a(\text{InP})$  分别为  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  有源层与 InP 缓冲层的晶格常数。当有源层晶格与缓冲层相匹配  $a(x, y) = a(\text{InP})$  时, 可解出满足 1.25  $\mu\text{m}$  阈值波长的  $x = 0.25$ ,  $y = 0.55$ 。

## 2. 场助 InGaAsP 光电阴极的材料生长

采用液相外延技术, 用两相法生长 InP 缓冲层以保证一定厚度, 用有一定过冷度的分步冷却法生长 InGaAsP 有源层以满足纵向组分均匀。将 InP 衬底及生长源 (In:InAs:GaAs:InP = 1000:70:9.9:3.9) 放入生长系统经 675 $^\circ\text{C}$  熔源 40 分钟, 再以 1 $^\circ\text{C}/\text{min}$  降温至 670 $^\circ\text{C}$ , 让衬底表面回熔 10~15 sec 以消除高热腐蚀损伤, 随后生长缓冲层, 同时温降渐至 0.1 $^\circ\text{C}/\text{min}$ , 到 640 $^\circ\text{C}$  时恒温 5 min, 接着生长有源层。InP 衬底上生长 InP 缓冲层(厚约 4  $\mu\text{m}$ ) 和 InGaAsP 有源层(厚约 2.5  $\mu\text{m}$ ), 界面平直且厚度均匀, 理想的解理面见图 3。

## 3. 场助 InGaAsP/InP 光电阴极欧姆接触及肖特基结的制备

场助偏压通过表面银膜与衬底背面的欧姆接触加到半导体光电阴极上, 欧姆接触的电极在小型真空(优于  $1.3 \times 10^{-3}$  Pa)蒸发(源为 Au-5~10% Zn)系统内制备。外延片背面经  $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:4$  的酸液处理置入系统, 欧姆接触电极的厚度经蒸发电流和时间调控在 80~100 nm 间。

用离子泵组成超高真空(极限为  $8 \times 10^{-7}$  Pa)系统制备肖特基结, 以免制备前半导体表面沾污影响结特性乃至影响光电发射性能。阴极激活亦在此系统完成。

将做好欧姆接触的外延片与蒸发源(纯度 99.999% 银丝)经同上述酸液处理后装入系

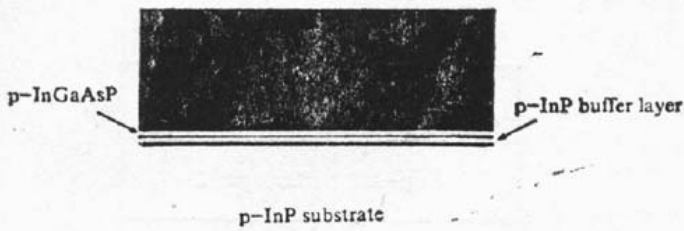


Fig. 3 Micrograph of cleaved cross section of InGaAsP/InP heterostructure

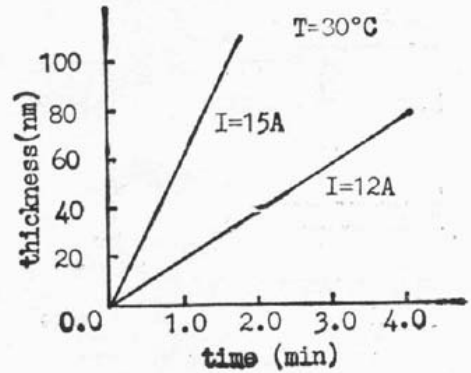


Fig. 4 Ag film thickness against evaporation time relationship at  $I=12\text{ A}$  and  $I=15\text{ A}$

统,蒸发间外延片温度控制在  $80^{\circ}\text{C}$ ,以增强银在 InGaAsP 表面的粘附性。依据  $1\text{ eV}$  电子在银中的平均自由程为  $26.5\text{ nm}$ <sup>[7]</sup>,精确调试蒸发时和电流,将银膜厚控制在  $10\sim 20\text{ nm}$  间,使电子有效地穿过肖特基结发射到真空中。蒸发时间与膜厚的关系见图 4。

实验证明,在超高真空中对外延层表面进行热清洁处理是获得接近原子清洁表面的有效方法。根据电流-电压法<sup>[8]</sup>测得经热处理的肖特基结理想因子  $n=1.08$ (理想值  $n=1$ ),而未经热处理的,  $n=2.16$ 。

#### 4. 场助光电阴极的激活

为降低表面真空能级和提高电子逸出几率,对已制备肖特基结的阴极表面用铯(源为中性镍通道源)和氧(源为加热银管的渗透氧)<sup>[9]</sup>进行激活处理。待数个周期缓慢进铯进氧后,光电流趋于饱和,即可对场助阴极的光电灵敏度进行测试。

### 三、测试结果和讨论

图 5 为 X 射线双晶衍射对阴极材料的测试曲线,因大部分 X 射线穿透较薄的 InGaAsP 有源层再经 InP 缓冲层衍射,故出现两个衍射峰,较强的为 InP 衍射造成。测试结果表明,本文方法的有源层与缓冲层间的晶格失配率仅为  $-1.23\times 10^{-4}$ ,明显优于文献<sup>[10]</sup>“应达到  $\Delta a/a\leq 3\times 10^{-4}$  的”标准。

用 2854 K 钨丝灯作光源、不同波长的干涉滤光干片、高灵敏度检测流计及激光功率计,测定反射式场助 InGaAsP/InP 异质结半导体光电阴极激活后的量子效率,见图 6 曲线。在测出阴极表面在各波长(同时测各波长的光电流)后,考虑功率计探头与阴极面积之比,即可得到光电阴极在所测波长的光谱灵敏度  $S$ ,由式  $Y(\lambda)=1.24S/\lambda$  即可获得相应的量子效率,这里,  $\lambda$  和  $S$  的单位分别为  $\text{nm}$  和  $\text{mA/W}$ 。

为了比较,图 6 还给出 Ag-O-Cs(S-1) 阴极的量子效率曲线。

InGaAsP 带隙较窄,经铯、氧激活后,真空能级降在表面费米能级之上约  $1.0\text{ eV}$  处<sup>[11]</sup>,而 InGaAsP 的  $L$  能谷边仅高出真空能级约  $0.1\text{ eV}$ 。因此,  $800\text{ nm}$  以下入射光子所产生的光电子有足够的能量越过表面势垒发射到真空中。在阈值附近因能量较低,则发射到真空中的几率亦较小,无偏压时,光电阴极在波长大于  $1.0\ \mu\text{m}$  时的量子效率较低;在场助偏压作用下随着能带的弯曲,真空能级逐渐降低,甚至低于体内导带底能级,得以在表面形成一个

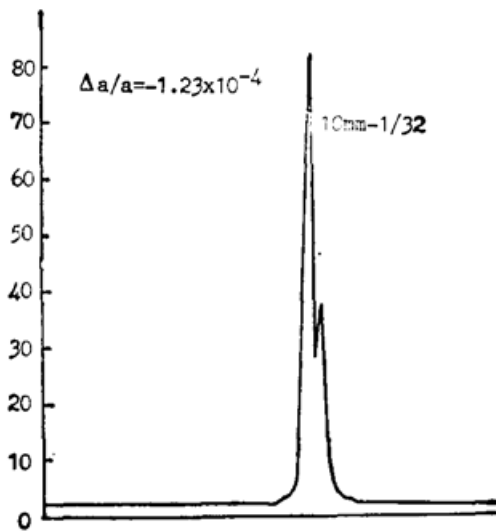


Fig. 5 X-ray double-crystal diffraction curve of InGaAsP/InP heterostructure

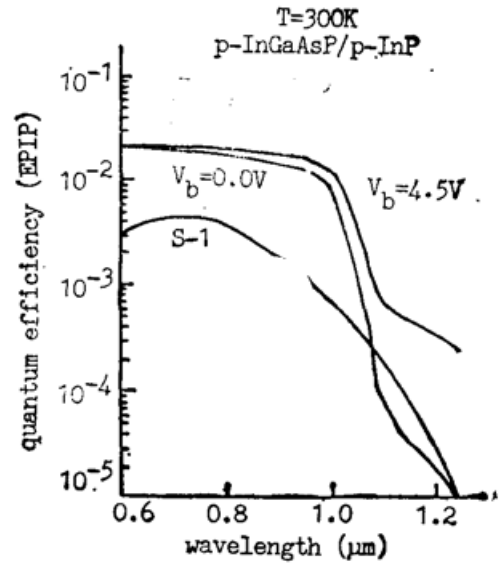


Fig. 6 Experimental reflection-mode quantum yield curve for bias and no-bias condition

有效的“NEA”状态。同时,光电子在耗尽区作用下,由 $\Gamma$ 能谷跃迁到 $L$ 能谷并发射到真空中。这样,明显提高了阈值附近的量子效率,但仍比 $1.0\mu\text{m}$ 以下干涉波长时的量子效率低近二个数量级。原因是,激活前为确保系统要求的超高真空所进行的高温烘烤导致肖特基结的热退化,当场助偏压大于 $4.5\text{V}$ 时,肖特基结的反向电流急剧增大而造成不可逆损坏。如何改善,有待作进一步实验研究。

#### 四、结 论

本文采用液相外延技术在 $p\text{-InP}$ 衬底上生长出晶格失配率为 $-1.23 \times 10^{-4}$ 的异质结场助阴极材料,通过热清洁处理,在超高真空系统内得到与80年代国际水平相当值( $n=1.08$ )的肖特基结。场助阴极材料经铯、氧激活后,由图6测试曲线表明:在 $1.25\mu\text{m}$ 处, $V_b=0.0\text{V}$ 与 $V_b=4.5\text{V}$ 时的量子效率分别为 $\sim 10^{-5}$ 和 $2.5 \times 10^{-4}$ ,经比较,后者比前者提高了一个数量级以上的量子效率,更比S-1阴极的量子效率高近二个数量级。

本文研究结果表明,场助异质结构半导体光电阴极是在红外波段很有潜力的光电发射体。

#### 参 考 文 献

- [1] K. Kasper *et al.*; *Photoelectronic Imaging*, 1985, **46**, No. 1 (Jan), 21~25.
- [2] Litton Electron Device Division; *Int. Def. Rev.*, 1987, **20**, No. 2 (Feb), 154.
- [3] V. L. Dalal; *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**, No. 3 (Mar), 1160~1164.
- [4] J. S. Escher *et al.*; *IEEE Trans. Electron. Device Lett.*, 1981, **EDL-2**, No. 5 (May), 123~125.
- [5] 李晋闽, 侯 洵;《博士论文》, (中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安, 1990).
- [6] R. E. Nahory *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **33**, No. 7 (Oct), 659~661.
- [7] C. R. Crowell, S. M. Sze; *Physics of Thin Films*, (Academic Press, New York, 1967), Ch. 4, 325.
- [8] N. Newman *et al.*; *IEEE Trans. Electron Devices*, 1980, **ED-27**, No. 7, 1244.
- [9] Sommer, 侯 洵译;《光电发射材料制备,特性与应用》, (科学出版社, 北京, 1979), 296~298.
- [10] M. Feng *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**, No. 6 (Sep), 533~535.
- [11] J. S. Escher *et al.*; *Phys. Rev. B*, 1987, **35**, No. 12, 6298.

## Field-assisted semiconductor photocathode with InGaAsP/InP heterojunction

LI JINMIN, GUO LIHUI, HOU XUN, WANG CUNRANG AND ZHANG GONGLI  
(Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xi'an 710068)

(Received 4 February 1991; revised 13 May 1991)

### Abstract

The material growth, preparation of Schottky junction and activation technique for a field-assisted heterojunction semiconductor photocathode with  $1.25\ \mu\text{m}$  threshold have been studied in detail. The photocathode with higher response in the wavelength range from  $0.9\ \mu\text{m}$  to  $1.25\ \mu\text{m}$  has been achieved. Utilizing the LPE technology, the material of heterojunction field-assisted photocathode has been obtained with the mismatch rate better than  $-1.23 \times 10^{-4}$ . The optimum value ( $n=1.08$ ) of ideal factor for the field-assisted Schottky junction has been obtained in the UHV system. At 4.5 V bias, the quantum efficiency is  $2.5 \times 10^{-4}$  at  $1.25\ \mu\text{m}$ , which is nearly 2 orders of magnitude higher than that of Ag-O-Cs (S-1) photocathodes at same wavelength.

**Key words:** field-assisted photocathode; InGaAsP/InP heterojunction.