

文章编号: 1001-4322(2005)01-0013-04

用激光微细加工制作平面型 InGaAs/InP PIN 光探测器*

吴云峰, 廖云, 叶玉堂, 焦世龙, 张雪琴

(电子科技大学 光电信息学院 四川 成都 610054)

摘要: 采用激光微细加工技术来制作单片集成光接收机的探测器,在制作过程中,用固态杂质源 10.6 μm 激光诱导 Zn 扩散工艺来进行探测器的 p-区掺杂。制作出平面型顶部入射的 InGaAs/InP PIN 光探测器,响应度为 0.21 A/W。分析了激光诱导扩散中影响探测器性能的因素,因此提出了扩散温度自动控制、扩散区温度分布均匀化及激光焦斑与扩散区精确对准等相应的改进方法。

关键词: 激光微细加工; 单片集成光接收机; PIN 光探测器; 激光诱导扩散

中图分类号: TN21 文献标识码: A

目前,由于在光通信等领域中具有广阔的应用前景,单片集成长波长光接收机已得到深入的研究^[1,2]。已有报道中的探测器大多采用台面型 PIN 结构,很少采用平面型结构。而平面型结构在暗电流、可靠性等方面比台面型结构具有明显的优势^[3,4],在分离元件型探测器中得到了普遍应用。究其原因,可能是因为平面型 PIN 结构探测器的制作需要采用扩散工艺,而单片集成长波长光接收机中的高速微波电路器件根本无法经受常规扩散工艺过程中的高温热冲击。激光微细加工具有“低温处理”、“局域升温”的特点^[5],我们提出利用该工艺在单片集成长波长光接收机中制作可靠性高的平面型 PIN 结构光探测器。本文首先介绍用激光微细加工制作平面型 InGaAs/InP PIN 光探测器的方法,然后讨论实验结果及制作过程中影响探测器性能的因素,并提出了解决办法。

1 InGaAs/InP 光探测器的结构和制作工艺

InGaAs/InP PIN 光探测器的结构如图 1 所示,为平面型顶部入射结构。在 n^+ -InP 衬底上生长一层 n-InP 缓冲层,然后生长 i-InGaAs 本征层。扩散 Zn 形成 p^+ -InGaAs 层。

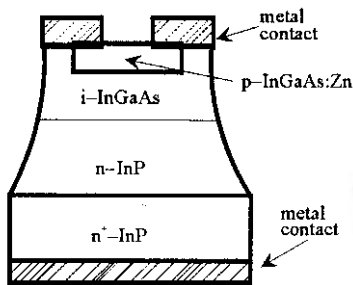


Fig. 1 Cross section of InGaAs/InP PIN photodiode

图 1 InGaAs/InP PIN 光探测器的结构

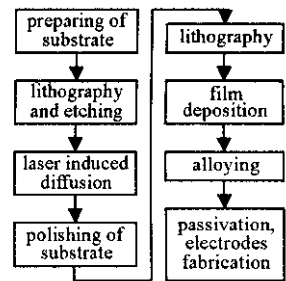


Fig. 2 Fabrication process of InGaAs/InP PIN photodiode

图 2 InGaAs/InP PIN 光探测器的制作过程

探测器的制作工艺过程如图 2 所示。首先需要外延出满足要求的材料结构,但我们选购的是已外延好的基片,因此在图 2 中,省去了外延的工艺步骤。温度最高的工艺过程是扩散工艺,在光刻、钝化膜的制备、电极制作及解理封装等其它工艺过程中,基片并不承受高温。探测器中的合金工艺虽然需要一定的高温,但与 HEMT(高电子迁移率晶体管)等微波器件的栅极和漏极的合金工艺兼容。因此,只有扩散工艺需要由激光微细加工完成,而其它工序均可采用常规工艺。下面主要介绍激光诱导扩散工艺。

激光微细加工实验装置如图 3 所示, CO_2 激光器输出的 10.6 μm 激光束经反射镜 M、锗透镜 L_1 聚焦后照射在 InGaAs/InP 基片 S 上,完成激光诱导扩散。曝光区近似为圆,面积大小可通过固定基片的 3 维调节架进

* 收稿日期 2004-02-17; 修订日期 2004-09-22

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(60277008) 教育部重点科技项目资助课题(03147); 中国电子科技集团电子科学研究院资助课题
作者简介: 吴云峰(1972—),男,重庆万州人,博士研究生,目前从事单片光电集成(OEIC)器件的激光微细加工技术研究, E-mail: yfwu-72@163.com.

行调节。专用的温度测量系统可测量曝光区内各部分面元的温度^[6]。通过聚焦状况或激光输出功率的调节,可以改变曝光区的温度。

激光诱导扩散工艺流程如图 4 所示。扩散前在 n 型 InP 衬底表面制备含 Zn 的 SiO₂ 胶膜作为扩散源。首先对 InP 基片进行去污处理,依次用丙酮、乙醇、去离子水冲洗,再用 1:1 的 HCl 去离子水溶液浸泡 3 min。再用去离子水漂洗后在超净台上用红外灯烘干。然后用离心式涂胶机在 InP 表面制备含 Zn 的 SiO₂ 乳胶膜,涂胶机转速 2 000 ~ 3 000 r/min,涂胶时间定为 30 ~ 60 s (视片子大小、涂胶厚度以及对 p-n 结性能要求而定)。把涂好胶的基片放入 80 °C 的恒温箱中烘烤 20 min,除去溶剂,烘干胶膜,即完成胶膜的制备。在激光诱导扩散中,涂胶膜起到双重作用:为 InP 衬底提供一层密封膜,阻止 InP 衬底的分解;同时作为掺杂 Zn 源。

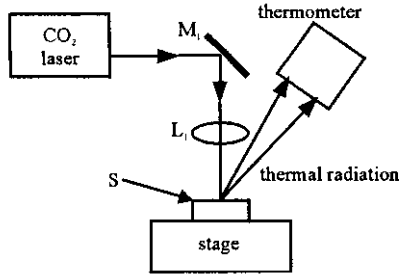


Fig. 3 Experimental setup for laser induced diffusion

图 3 激光诱导扩散实验装置

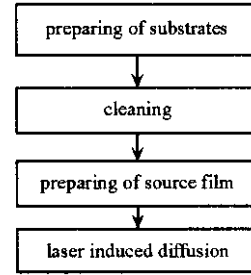


Fig. 4 Technics flowchart of laser induced diffusion

图 4 激光诱导扩散的工艺流程图

制备好胶膜后,即可在图 3 所示的实验装置中用激光束照射样品,完成 Zn 向 InP 衬底中的扩散。通过对扩散时间和扩散温度的调节,进而可控制结深度等性能参数。曝光后的样品用 1:10 的 HF 去离子水溶液浸泡 30 ~ 40 s,去掉基片表面的 SiO₂ 胶膜,再用去离子水漂洗多次,然后在 80 °C 的烘箱中烘烤 20 min,整个激光诱导扩散就完成了。

2 结果与讨论

2.1 激光诱导扩散的实验结果

扩散 p-n 结结深度 d_j 、击穿电压 V_B 与扩散温度 θ 的关系如表 1 所示。从表 1 可以看出,InP 基片的 Zn 固态杂质源激光诱导扩散,有 p-n 结生成的扩散温度范围是 450 ~ 580 °C。这个范围内,温度越高,Zn 的扩散越充分,生成的扩散结的质量越好,p-n 结所能承受的反偏电压越大。

实验也表明,扩散 p-n 结结深度 d_j 随着扩散时间 t 的增加而增加,但当扩散时间达到一定程度时,单纯因为扩散时间的增加对结深度的影响并不明显。

表 1 扩散 p-n 结结深度 d_j 、击穿电压 V_B 与扩散温度 θ 的关系

Table 1 Relation of the diffusion depth of the p-n junction d_j , breakdown voltage V_B , and diffusion temperature θ

No.	$\theta/^\circ\text{C}$	test results	V_B/V	analysis of the reason	d_j	remark
1	< 450	no damage, no p-n junction formed	—	the temperature is very low	—	
2	480	no damage, p-n junction formed	10.8	normal diffusion	d_{j2}	
3	520	no damage, p-n junction formed	14.6	normal diffusion	d_{j3}	$d_{j2} < d_{j3} < d_{j4}$
4	580	no damage, p-n junction formed	22.9	normal diffusion	d_{j4}	
5	600	light damage, no p-n junction formed	18.4	the temperature is high	—	
6	> 620	damage, no p-n junction formed	—	the temperature is very high	—	

2.2 工艺过程中影响探测器性能的因素

我们用激光微细加工的方法制作出了平面型 InGaAs/InP PIN 光探测器,但其响应度仅为 0.21 A/W,探测器的性能不理想。由于除扩散工艺外,其它工序均采用常规高速探测器制作工艺,所以,导致探测器性能较差的主要原因应该是激光诱导扩散工艺。

扩散的目的是在基片表面形成满足器件设计要求的杂质(Zn)分布。扩散系数 D 与扩散热力学温度 T 的关系为

$$D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{\chi \varepsilon}{k_B T}\right) \quad (1)$$

式中 D_0 为常数, χ 为频率因子, ε 为扩散激活能, k_B 为玻耳兹曼常数。

由式(1)可知,扩散后的杂质分布受扩散温度的强烈影响。为制作出性能良好的器件,扩散区理想的温度应均匀分布,而且在扩散过程中应保持稳定。但事实上,以下几个因素使上述扩散工艺不能满足这个要求。

(1) 诱导扩散过程中,由于入射激光功率变化、环境温度漂移等原因,扩散区温度会出现较大幅度波动。

(2) 虽然我们用工刻窗口的方法来限制了扩散区域,但由于加工用的是波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光,而且扩散区和激光焦斑的直径都只有数十 μm ,未能采取有效措施将激光焦斑与光刻窗口精确对准。

(3) 由于激光焦斑光强分布接近高斯分布以及热传导等原因,入射激光束在基片上产生的热斑温度分布不是“平顶帽形”分布。

2.3 改进激光诱导扩散工艺的方法

首先是在激光诱导扩散过程中,对激光曝光区温度进行自动控制。我们在文献[6]基础上,设计研制了如图5所示的计算机温度闭环控制系统,控制过程将使曝光区的温度稳定在设定范围。

其次,提出用对激光焦斑光强进行空间调制的方法来实现扩散区温度分布的均匀化。目前,人们在高斯光束均匀化方面开展了广泛的研究,可以得到均匀的焦斑光强分布^[7,8]。但因为激光曝光区直径仅数十 μm ,即使激光光强分布均匀,由于热传导等原因,扩散区温度分布也达不到实验要求的均匀。考虑到激光微细加工实验时光能利用率的要求并不苛刻,可以通过理论计算和实验相结合的方法设计出掩模对焦斑光强进行调制,以在扩散区得到均匀的温度分布。

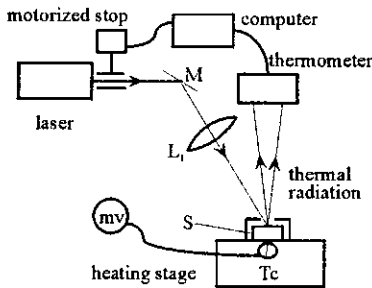


Fig. 5 Experimental setup for the temperature control system

图5 温度控制系统的实验装置

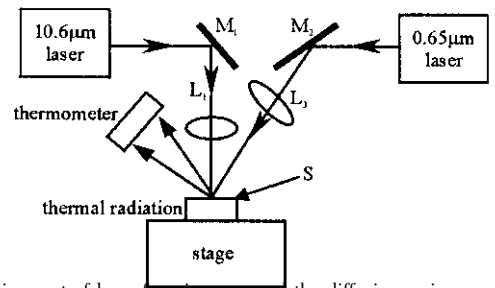


Fig. 6 Alignment of laser focusing spot and the diffusion region

图6 激光焦斑和基片扩散区的对准装置

最后,建立了专门的系统实现直径均为数十 μm 的激光焦斑和扩散区的精确对准。系统装置如图6所示。首先用加工用的 $10.6\ \mu\text{m}$ CO_2 激光焦斑在基片 S 上形成一直径数十 μm 的微小轻微损伤点,关闭加工用激光,这一损伤点就确定了激光焦斑的位置。然后用光强较弱的可见光波段的激光聚焦后精确的对准这一损伤点。这就完成了可见光焦斑和不可见激光焦斑的精确对准。通过 3 维位移平台移动基片,使得光刻扩散窗口和可见激光焦斑精确对准。关闭可见激光,开启加工用激光,激光焦斑就处于光刻扩散窗口的位置。

3 结论

用常规工艺难以在单片集成长波长光接收机制作平面型 PIN 光探测器。我们提出用激光微细加工的方法来解决这个问题。作为这项工作的第一步,用常规工艺和激光诱导扩散相结合的方法制作出了平面型 In-GaAs/InP PIN 光探测器,但制作出的探测器响应度仅 $0.21\ \text{A/W}$ 。经分析后认为,这主要是由于扩散后杂质浓度分布与设计要求相差较远。因此,提出了扩散区温度自动控制、扩散区温度分布均匀化及激光焦斑和扩散区精确对准等改进激光诱导扩散工艺的方法。这为进一步制作出性能优良的器件提供了参考。

参考文献：

- [1] Bach H G, Beling S, Mekonnen G G, et al. Design and fabrication of 60-Gb/s Inp-based monolithic photoreceiver OEICs and modules[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(6): 1445—1450.
- [2] Shimizu N, Murata K, Hirano A, et al. 40-Gbit/s monolithic digital OEIC composed of untravelling-carrier photodiode and InP HEMT[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(14): 1220—1221.
- [3] Skirrimshire C P, Farr J R, Sloan D F, et al. Reliability of mesa and planar InGaAs PIN photodiodes[A]. *IEE Proceedings[C]*. 1990, 136(1): 74—78.
- [4] Wang G, Yoneda Y, Hanawa I, et al. Highly reliable high performance waveguide-integrated InP/InGaAs PIN photodiodes for 40 Gbit/s fibre-optical communication application[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(15): 1147—1149.
- [5] 叶玉堂. 激光微细加工[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1995. (Ye Y T. Laser assisted microprocessing. Chengdu: Press of University of Elec-

tronic Science and Technology, 1995)

- [6] 李忠东, 叶玉堂, 洪永和, 等. 连续波激光诱导扩散区温度的不接触测量[J]. 应用科学学报, 1997, 15(4): 413—417. (Li Z D, Ye Y T, Hong Y H, et al. Remote sensing of the temperature of the exposed region in laser assisted diffusion. *Journal of Applied Sciences*, 1997, 15(4): 413—417)
- [7] 李永平, 陈德伟, 王伟. 应用于光束均匀化整形的 SAGAGD 算法[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(1): 60—64. (Li Y P, Chen D W, Wang W. SAGAGD method for the beam shaping of uniform illumination. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(1): 60—64)
- [8] 谭峭峰, 严瑛白, 金国藩, 等. 菲涅耳区衍射光学束匀滑器件的设计[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(2): 125—128. (Tan Q F, Yan Y B, Jin G F, et al. Design of diffractive optical element for beam smoothing in Fresnel diffraction region. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(2): 125—128)

Fabrication of planar InGaAs/InP PIN photodiodes using laser assisted microprocessing

WU Yun-feng, LIAO Yun, YE Yu-tang, JIAO Shi-long, ZHANG Xue-qin

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract : As the fundamentals of the fabrication of monolithically integrated optical receiver, a photodiode has been fabricated using laser assisted microprocessing. Laser induced local zinc diffusion has been used to form the p-n junction of the photodiode. The diffusion process was implemented by using the focused laser spot to heat the diffusion window. A spin-on film doped by Zn was used as the diffusion source. Lithography, passivation, electrodes fabrication and packaging are conventional, as the wafers don't endure high temperature in these steps. The responsivity of the fabricated Planar InGaAs/InP PIN photodiodes arrived 0.21 A/W. It was found that some factors in the laser induced diffusion process caused the low performance of the photodiodes. Then improvements including the automatic controlling of the diffusion temperature, the flattening of temperature distribution in the small diffusion region, and the aligning of the invisible laser focus spot and the diffusion region are proposed.

Key words : Laser assisted microprocessing ; Monolithically integrated optical receiver ; PIN photodiodes ; Laser induced diffusion