

InP 基片在连续波 CO₂ 激光局域加热时的温度上升特性*

吴云峰 叶玉堂 吴泽明 杨先明 秦宇伟

(电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

摘要: 采用聚焦连续波 CO₂ 激光束对 n 型 InP 基片进行局域加热, 并利用专用的温度测量系统对 InP 基片曝光区的温度分布及温度随时间的变化进行了测量。结果表明, 在基片初始温度为室温时, 难以得到满足加工所要求的温度上升。增大曝光区面积和对基片预热可以使温度上升的幅度达到要求, 但温度的稳定性较差。采用研制的温度控制系统, 可方便地得到满足激光微细加工要求的稳定温度上升。

关键词: InP; 激光微细加工; 激光诱导温度上升

PACC: 4262A

中图分类号: TN3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)08-0956-05

1 引言

半导体的激光微细加工技术具有“直接写入”、“低温处理”等独特的优越性, 在微电子、光电子、集成光学及光电混合集成等领域有着广阔的应用前景^[1]。自 20 世纪 70 年代末期以来, 国内外在这方面的研究非常活跃^[2~7]。

由于光纤通信、光互连以及光信息处理等系统的需求, 单片光电集成电路(OEICs)自 20 世纪 80 年代以来, 得到了广泛而深入的研究。由于单片 OEICs 需要将光、电两类功能和材料结构不同的器件集成到同一衬底上, 因此需要解决材料和工艺兼容性问题。虽然现有工艺通过选择腐蚀、生长及快速热处理等方法部分解决了这一问题, 但还是工艺复杂, 产品成本很高。为此, 我们提出利用激光微细加工的方法制作单片 OEICs 器件。方法是将电路和光路部分分开来做, 即先在半导体衬底上用常规的集成电路工艺做好集成电路, 再利用激光微细加工的直接写入功能, 一次性“写入”p-n 结和欧姆接触, 以制做光器件。这样可以避免高温热损坏半导体基片和集成电路, 从而使 OEICs 各个部分性能达到最

优, 提高 OEICs 的整体性能。

考虑到半导体材料声光、电光等方面的特性, GaAs, InP 等化合物才是 OEICs 更为理想的基底材料, 尤其 InP 是光纤通信长波长范围(1.3~1.55 μm)半导体光器件理想的基底材料。因此, 实验中我们采用了 InP 作为基底材料, 还采用聚焦连续波 CO₂ 激光束作为激光微细加工的光源, 在基片上的激光焦斑直径仅为数十微米。由于激光曝光区的温度是激光诱导扩散、激光诱导合金等实验的关键工艺参数, 所以必须对微小曝光区的温度上升规律进行仔细研究。

尽管半导体基片在激光照射下的温度上升特性已经得到了广泛的研究^[7~11], 但很多文献仅是理论分析和计算^[8,9]。由于具体的实验条件不同, 特别是基片材料的光吸收系数和热传导率随温度的变化规律不同, 这些结果很难直接作为实验时的工艺参数。文献[10]给出了在 10.6 μm 激光照射下, GaAs 基片的温度随激光功率变化的实验结果并进行了讨论, 但该文中, 激光曝光区面积较大, 并没有讨论温度随时间的变化以及温度在基片表面的分布。文献[11]给出了在不同激光功率密度下, Si 在 10.6 μm CO₂ 激光照射下的温度随时间上升的实验结果, 但假定

* 国家自然科学基金(批准号: 60277008) 和教育部科学技术研究(项目号: 03147) 资助项目

了整个基片的温度是均匀的。这些实验中的情况都与我们的实验相差较大。

我们利用专用的温度测量系统对 n 型 InP 基片在不同初始温度和入射激光束功率下的温度上升进行了测量, 对测量结果进行了分析和讨论, 并在此基础上研制了微小高温区的温度控制系统, 获得了满足激光微细加工要求的稳定温度上升。这为改进激光微细加工工艺打下了良好的基础。据我们所知, 目前还没有对半导体基片表面微小曝光区的激光诱导温度上升规律进行实验研究, 并对温度上升进行控制的类似报道。

2 实验

实验装置如图 1 所示。CO₂ 激光器输出的 10.6 μm 激光束经反射镜 M、锗透镜 L₂ 聚焦后照射在 n 型 InP 基片 S 上。激光器的功率通过调节激光器电流来改变, 并可用光功率计测出。承载基片的平台可加热, 因此可改变基片的预热温度。基片的预热温度用热电偶 T_c 测出, 基片上微小曝光区的温度可由温度测量系统测出。

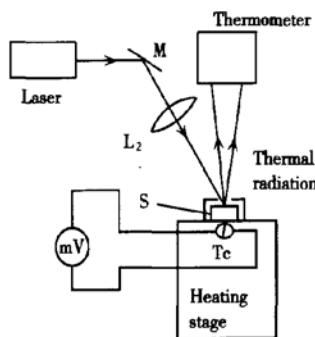


图 1 半导体基片在激光照射下温度上升的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for laser induced temperature rise

我们在文献[7]的基础上做了改进, 研制了计算机温度测量系统, 其组成如图 2 所示。基片上 Σ 区受激光照射升温而发出较强的热辐射, 由透镜 L₁ 将 Σ 中被测面积元(直径约 18 μm)的热辐射会聚在光电探测器 D 的光敏面上, 并通过 D 把 Σ 中被测面积元的热辐射转变为光电流, 实际上也就是把 Σ 的温度信号变为电流信号。电流放大器将电流信号转换为电压信号, 再经 A/D 转换器转为数字信号输入计算机进行计算、记录及显示。通过实验定标^[7], 可将

数字量直接和温度对应。通过计算机控制精密电动平台移动, 从而测出热斑 Σ 的温度分布。同时可控制测温系统对准热斑的最高温度区域, 测出温度随激光照射时间的变化过程。

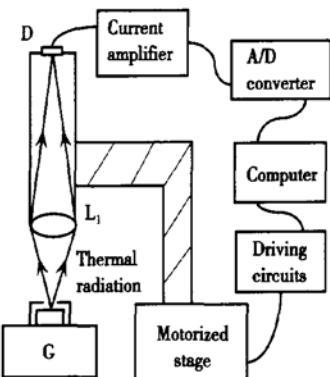


图 2 温度测量系统的组成

Fig. 2 Construction for the temperature measurement system

由于系统采用的是辐射测温的原理, 我们采用了文献[7]中的方法对测温系统进行了定标。从定标结果中可以看出, 在温度为 600℃附近, 温度分辨率达到了 0.2℃。在温度为 500℃附近, 温度分辨率达到了 0.5℃。需要指出的是, 虽然我们采用了定标的方法使系统测得的结果尽量接近基片曝光区的实际温度, 但我们更关心的是系统的温度分辨率。

3 结果与讨论

实验中, 首先将曝光区面积调到最小, 并在基片初始温度为室温时, 对基片曝光区的温度上升进行了测量。结果发现, 当激光器输出功率在 14W 以下时, 基片曝光区的温度上升很小, 用我们的温度测量系统根本检测不到这样的温度变化。但当激光器输出功率稍大于 14W 时, 曝光区温度就会随时间缓慢上升, 并在几秒钟后迅速上升到很高的值, 以至于损坏基片。当增大曝光区面积时, 这个阈值功率会增加, 而且使用低于这个阈值的功率时, 已经可以用测温系统检测到明显的温度上升, 但温度上升值还不能满足激光微细加工的要求。调节曝光区面积和激光器输出功率, 采用 22W CO₂ 激光器, 我们没能得到符合激光微细加工实验要求的温度上升特性。从下面的讨论可看出, 上述现象的产生与 InP 基片对 10.6 μm 光波的吸收机制有关。

InP 基片对 $10.6\mu\text{m}$ 光波的吸收机制主要是自由载流子吸收。自由载流子吸收系数 α 的经典公式是：

$$\alpha = \frac{Ne^2\lambda^2}{m^* 8\pi^2 n c^3 \tau} \quad (1)$$

其中 N 是自由载流子浓度; e 为电子电量; λ 为被吸收的光波波长; n 是材料折射率; τ 是弛豫时间; c 是光速; m^* 是载流子的有效质量。由(1)式看出, 吸收系数 α 与自由载流子浓度 N 成正比。

由于热激发会产生电子-空穴对, 自由载流子浓度 N 会随温度升高而增大, 因此吸收系数 α 也将随温度上升而增大。在激光开始照射基片时, 由于基片温度为室温, 吸收系数非常小, 基片吸收的激光能量很少, 曝光区温度只能有少量的增加。但曝光区温度的增加会使吸收系数增大, 使基片吸收更多的激光能量, 曝光区温度进一步增加。这个正反馈过程将持续下去, 直到在某个温度值, 由于吸收系数增加引起的吸收热量的增加值和由于温度升高引起的热量耗散值相等时, 该过程停止, 温度上升达到稳定值。但这个平衡点的温度值在不同曝光区面积和入射激光束功率时不同。当激光功率密度达到一定值时, 温度上升过程将不能达到平衡点, 温度将持续上升, 并损坏基片。

由于径向传导散热在基片总的吸收能量中所占的比例随曝光区直径增大而下降, 欲使曝光区温度上升相同的值, 在曝光区面积较小时所需的激光功率密度就更大。因此, 在曝光区面积较大时, 比较容易使用较低的激光功率密度达到较高的温度上升。实验中, 由于曝光区直径只有数十微米, 因此激光功率密度较大, 吸收系数的微小变化都会使基片吸收的能量产生剧烈变化, 因此很容易出现不能达到平衡点的情况, 这时, 曝光区温度就会随激光照射时间不断上升, 以致于损坏基片。同时, 由于曝光区面积小, 径向传导散热在基片总的吸收能量中占的比例很高, 而基片初始温度为室温时吸收系数又非常小, 即使激光功率密度较大, 也可能在较低的温度值处达到平衡。事实上由于激光功率密度较大, 而温度较高时的吸收系数较大, 平衡点不可能在较高温度时出现, 这就是出现上述阈值功率密度的原因。

为了解决上述问题, 得到满足激光微细加工要求的温度上升特性, 我们采取了两个措施: 首先是预热基片, 其次是适当增大曝光区面积。由于预热使得基片初始吸收系数增大, 我们采用较小的激

光功率, 就可以使温度上升过程在较高温度时达到平衡。这时, 基片曝光区的温度上升幅度已经可以满足要求。由于激光功率较小, 离阈值较远, 温度上升不易失控。

图 3 是在预热温度 $T_0=580\text{K}$ 和激光器输出光功率 $P=10\text{W}$, 且温度上升基本稳定时, 热斑温度分布的测量结果。从图 3 可以看出, 随着离热斑中心距离 r 的增大, 温度单调下降。由激光诱导产生的温度上升为图 3 所示温度值减去预热温度 T_0 。设热斑中心温度上升值为 T_r , 我们用温度上升为 T_r 的 90% 对应的离热斑中心的距离 r_s 来标志热斑大小。在不同预热温度和激光器输出功率时的 T_r 和 r_s 如表 1 所示。从表 1 可以看出, 随预热温度和入射激光功率的增加, 热斑中心温度上升增大, 而 r_s 减小, 使得热斑温度随半径的梯度随 T_0 和 P 的增加而增大。

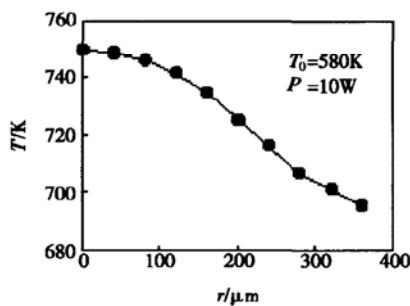


图 3 热斑的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of the heated region

表 1 不同实验条件下热斑的温度上升及热斑尺寸

Table 1 Temperature rise of the heated region and its size under different conditions

T_r/K	$r_s/\mu\text{m}$	Preheating temperature/K	Incident laser power/W
73	270	610	9
170	170	580	10
121	160	630	9
232	130	630	10

从图 3 还可以看出热斑温度梯度 dT/dr 的绝对值随热斑半径 r 的变化。在 r 较小时, $|dT/dr|$ 从 0 开始, 随 r 迅速增加; 随着 r 的增加, $|dT/dr|$ 的增加变得平缓, 逐渐达到最大值, 然后开始减小, 随着 r 的进一步增加, $|dT/dr|$ 的变化变得非常平缓, 但此时的温度 T 仍然较高。这说明热斑的温度分布虽然在中心区域具有较大的温度梯度, 但整个热斑的

分布面积较大. 和 Lax 的理论计算结果^[8]比较, 温度分布的曲线形状基本相似, 但是实验中的热斑分布面积明显偏大. 这可能是由于实验中不满足半无限的边界条件所致.

图 4 是在预热温度 $T_0=580\text{K}$ 和激光器输出光功率 $P=10\text{W}$ 时热斑中心温度随时间变化的测量结果. 从图 4 可以看出, 当激光束开始照射在基片上后, 基片温度将迅速升高, 然后基片温度继续随时间升高, 但上升速度明显变慢. 同时从图 4 也可以看到, 即使在激光束照射较长时间后, 基片温度也会在某一温度值附近随时间变化. 这可能是由于入射激光功率变化及基片周围环境温度变化所致.

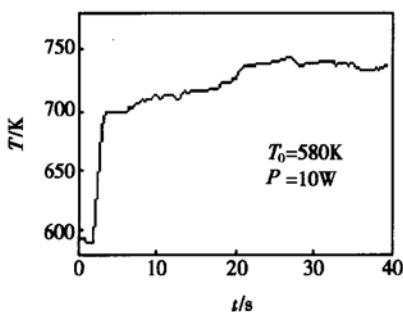


图 4 热斑中心温度随激光束照射时间的变化

Fig. 4 Change of temperature of the central heated region with the time irradiated by the laser beam

由于激光诱导扩散等实验要求曝光区温度较稳定, 还需要对曝光区温度进行控制, 为此我们在上述温度测量系统的基础上研制了计算机温度闭环控制系统. 该系统根据测得的曝光区温度值, 由计算机按一定的控制策略控制电动可调光阑的孔径大小, 以调节入射激光束功率, 进而改变曝光区温度. 随着调节过程的进行, 基片曝光区温度将被稳定在设定值. 控制策略的确定考虑了上述温升规律.

图 5 是在预热温度 $T_0=580\text{K}$ 和激光器输出光功率 $P=11.5\text{W}$ 时, 得到的扩散区温度随激光照射时间的上升曲线. 图 5 显示, 在激光照射 3 s 后, 温度迅速上升, 无法控制. 实验中同时发现, 基片上曝光区明显熔化, 受到损坏. 在同样的预热温度和曝光区面积的情况下, 将激光器输出功率调为 $P=13.5\text{W}$, 温度设定值设为 756K , 进行温度控制, 得到的温度-时间曲线如图 6 所示. 从图 6 看出, 在激光照射 4 s 后, 曝光区温度就趋于稳定. 控制精度可达到 $\pm 2^\circ\text{C}$, 已经可以很好地满足激光微细加工的要求. 将图 6 和图 5、图 4 比较, 可以看出采用控制系统后温度上

升明显稳定, 并避免了温度上升过程失控. 在实验中也由于温度控制系统的引入, 不必对曝光区面积、基片预热温度和激光器的输出功率做仔细的调节就可以方便地得到需要的温度上升.

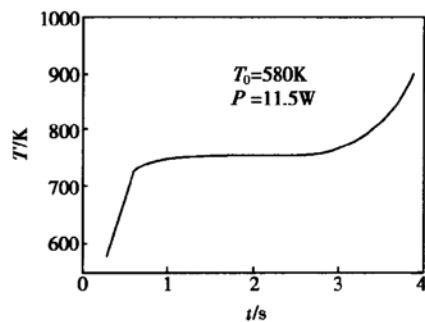


图 5 不加温控时热斑中心温度随激光照射时间的变化

Fig. 5 Change of temperature of the central heated region with the time irradiated by the laser beam without temperature control

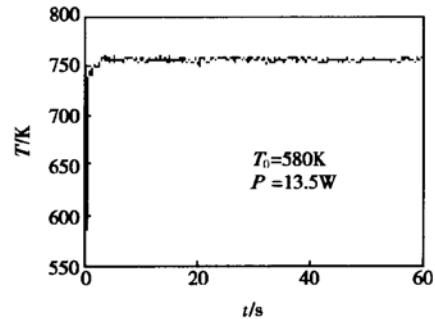


图 6 加温控后热斑中心温度随激光照射时间的变化

Fig. 6 Change of temperature of the central heated region with the time irradiated by the laser beam under temperature control

4 结论

本文对连续波 CO₂ 聚焦激光束照射 n 型 InP 基片时, 微小曝光区的温度分布以及温度随激光束照射时间的变化过程进行了研究. 实验结果表明, 在基片初始温度为室温时, 很难通过调节曝光区面积和入射激光功率来获得满足激光微细加工要求的温度上升特性. 分析发现这主要是由于 InP 基片对 10.6 μm 波长的光的吸收系数随温度升高而增大所致. 为此, 采用了增大曝光区面积和对基片进行预热的方法. 由于预热增大了基片的初始吸收系数, 采用较小的激光功率密度就可以获得满足要求的温度

上升幅度。但为了获得需要的温度上升值, 必须仔细调节预热温度和激光功率密度。而且由于激光功率和环境温度等不稳定, 导致了曝光区温度的稳定性较差。为此, 研制了温度闭环控制系统。通过上述温度上升的规律设计了系统的控制策略, 可以方便地调节温度上升并稳定在需要的数值。本文的工作对优化半导体的激光微细加工工艺, 制做出高性能的器件有重要意义。据我们所知, 目前还没有对半导体基片表面微小曝光区的激光诱导温度上升规律进行实验研究, 并对温度上升进行控制的类似报道。

参考文献

- [1] Ye Yutang. Laser assisted microprocessing. Chengdu: Press of University of Electronic Science and Technology, 1995[叶玉堂. 激光微细加工. 成都: 电子科技大学出版社, 1995]
- [2] Ye Yutang, Li Zhongdong, Hong Yonghe, et al. Pulsed Nd: YAG laser induced diffusion of Zn into GaAs using solid state diffusion source. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(4): 419[叶玉堂, 李忠东, 洪永和, 等. GaAs 衬底的固态杂质源脉冲 $1.06\mu\text{m}$ 激光诱导扩散. 光学学报, 1997, 17(4): 419]
- [3] Ye Yutang, Li Zhongdong, Hong Yonghe, et al. Continuous wave CO₂ laser induced diffusion of Zn into GaAs using a solid state diffusion source. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, 24(3): 237[叶玉堂, 李忠东, 洪永和, 等. 用固态杂质源在 GaAs 衬底上实现的连续波 CO₂ 激光诱导 Zn 扩散. 中国激光, 1997, 24(3): 237]
- [4] Baumgartner P, Wegscheider W, Bichler M, et al. Single-electron transistor fabricated by focused laser beam-induced doping of a GaAs/AlGaAs heterostructure. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(16): 2135: 2137
- [5] Bonchik A Y, Kijak S G, Gotra Z, et al. Laser technology for submicron-doped layers formation in semiconductors. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33: 589
- [6] Ong T K, Chan Y C, Ooi B S. Fabrication of multiple-wavelength lasers in InGaAs-InGaAsP structures using direct laser writing. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2001, 13(11): 1161
- [7] Li Zhongdong, Ye Yutang, Hong Yonghe, et al. Remote sensing of the temperature of the exposed region in laser assisted diffusion. *Journal of Applied Sciences*, 1997, 15(4): 413[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. 应用科学学报, 1997, 15(4): 413]
- [8] Lax M. Temperature rise induced by a laser beam. *J Appl Phys*, 1977, 48(9): 3919
- [9] Lu Y F, Aoyagi Y. Temperature rise and heat flux induced by laser beam with double-Gaussian intensity distribution. *Jpn J Appl Phys*, 1995, 34(7A): 3759
- [10] Kawamura T, Shimizu T. Thermal properties of low-resistive and semi-insulating GaAs wafers heated locally by Nd: Y₃Al₅O₁₂ laser beam. *J Appl Phys*, 1993, 74(1): 189
- [11] Siregar M R T, Lüthy W, Affolter K. Dynamics of CO₂ laser heating in the processing of silicon. *Appl Phys Lett*, 1980, 36(10): 787

Temperature Rise of InP Heated by CW CO₂ Laser Locally*

Wu Yunfeng, Ye Yutang, Wu Zeming, Yang Xianming and Qin Yuwei

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

Abstract: The n-type InP substrate is locally heated by a $10.6\mu\text{m}$ focused CW (continuous wave) CO₂ laser beam. And the temperature of the small exposed region on the InP substrate is the main parameter that determines the process. So the temperature distributions of the exposed region are measured under different experimental conditions. And the processes of temperature rising with the time irradiated by the laser beam are recorded. The results show that when the temperature of the substrate before adding the laser beam is at room temperature, it is very difficult to adjust the temperature rise to satisfy the requirement of experiments. The amplitude of the temperature rise can meet the requirement through preheating the substrate, but the stability cannot. A closed loop temperature control system is developed to solve this problem, and the control precision of $\pm 2^\circ\text{C}$ is obtained when the temperature is around 480°C .

Key words: InP; laser assisted microprocessing; laser induced temperature rise

PACC: 4262A

Article ID: 0253-4177(2004)08-0956-05

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60277008) and Key Science and Technology Program of the Ministry of Education (No. 03147)