

文章编号: 0258-7025(2004)03-0363-04

# 激光微细加工中微小曝光区域的计算机 温度测量系统

吴云峰, 叶玉堂, 吴泽明, 杨先明, 秦宇伟

(电子科技大学光电子技术系, 四川 成都 610054)

**摘要** 在半导体的激光微细加工技术里,微小曝光区域的温度分布是关键的工艺参数,必须得到精确的测量。而为了使温度测量不影响曝光区的温度分布,需采用不接触测量方法。研制了计算机温度测量系统,实现了微小激光曝光区温度的实时不接触测量。系统中,InGaAs/InP光探测器将微小高温区的温度信号转换为光电流,再经信号放大及模/数转换后输入计算机。结合温度定标实验,对测得的温度数据进行插值运算,在实验中可以实时显示出曝光区的温度值。系统的温度分辨率可达到 $0.2^{\circ}\text{C}$ ,测量区域的最小直径可达到 $18\ \mu\text{m}$ 。同时设计了搜索算法,使温度数据采集和精密位移平台的移动相配合,实现了温度分布的测量和最高温度区的准确定位。

**关键词** 激光技术;温度测量;激光微细加工;半导体

中图分类号 TG 665 文献标识码 A

## Computer-Controlled Temperature Measurement System for the Small Exposed Region in Laser Assisted Microprocessing

WU Yun-feng, YE Yu-tang, WU Ze-ming, YANG Xian-ming, QIN Yu-wei

(Department of Opto-Electronic Technology, University of Electronic Science  
and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract** In laser assisted microprocessing, the temperature distribution in the small exposed region is the main parameter. The temperature distribution should not be influenced by the measurement. Therefore the remote sensing of the temperature distribution in the small exposed region is needed. So a computer-controlled temperature measurement system has been developed. The system can realize the real time temperature measurement of the small laser-exposed region nonintrusively. In the system, a InGaAs/InP photodiode converts the radiation from the small high temperature region into photocurrent. Then the photocurrent is amplified, and converted into digital data. Combining with calibration experiment, the computer calculates the temperature through interpolation. The system can reach a temperature resolution of  $0.2^{\circ}\text{C}$ . The measurement region diameter of  $18\ \mu\text{m}$  is also obtained. At the same time, algorithm has been designed to cooperate the move of the motorized stage and the acquisition of temperature data. It follows that the measurement of temperature distribution and the accurate location of the highest temperature region are realized.

**Key words** laser technique; temperature measurement; laser assisted microprocessing; semiconductor

## 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<sup>[1]</sup>。如制作光电混合集成(OEIC)器件时,可以把电路和光路部分分开来做,即先在半导体衬底上做好集成

收稿日期:2002-09-28;收到修改稿日期:2003-01-27

基金项目:国家自然科学基金(编号:60277008)、电科院及四川省科技厅资助项目。

作者简介:吴云峰(1972—),男,电子科技大学博士研究生,主要从事单片 OEICs 的激光微细加工技术研究。E-mail:

yunfengwu@sc.cn

万方数据

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,可以避免高温热损坏半导体基片和集成电路,从而可以使 OEIC 各个部分性能达到最优,大大提高 OEIC 的整体性能。由于激光微细加工同时具有高空间分辨率及低损伤的特点,也使得它成为实现一些纳米结构器件的方法<sup>[2]</sup>。因此,自 20 世纪 70 年代末期以来,国内外在这方面的研究都比较活跃<sup>[2~6]</sup>。

在激光微细加工技术中,人们需要了解曝光区温度分布的细节,尤其是焦斑中心温度、热斑边界等重要信息。针对半导体基片温度的测量方法已有很多报道<sup>[7,8]</sup>,但大多是测量基片的平均温度,不能满足上述要求。本课题组曾经报道的微小高温区温度不接触实时测量系统,测量区域直径最小可以达到  $18\ \mu\text{m}$ ,温度分辨能力可以达到  $1^\circ\text{C}$ ,基本满足激光微细加工的要求<sup>[9]</sup>。但该系统在实际应用时有几个问题。首先是在进行温度测量时,需手动调节测温套筒的位置,难以寻找到曝光区的最高温度点,使测温带来误差;第二是要进一步提高温度分辨率时,测温范围达不到要求;第三是系统的调整和读数不方便,使在测量曝光区温度分布时,只能测较少的点,不能很好地反映曝光区温度分布的细节。另外,该系统还不能用于脉冲激光微细加工中的温度测量。本文在该系统的基础上,提出一种计算机温度测量系统,较好地解决了这些问题。该系统采用高精度、低漂移电流放大器对光电探测器产生的光电流进行放大,并将放大后的电压信号转换为数字信号输入计算机进行记录、处理,在温度为  $600^\circ\text{C}$  附近,将温度分辨率提高到  $0.2^\circ\text{C}$ ,并且扩大了测温范围。计算机通过控制电动平台移动测温套筒,自动搜索温度最高点,同时可以方便地测量温度分布。同时,计算机通过根据定标结果进行插值运算,可以直接显示出测量温度,给实验带来了方便。由于系统具有较快的响应速度(采样时间间隔约  $10\ \mu\text{s}$ )和自动记录功能,可用于脉冲激光微细加工中的温度测量。

## 2 系统装置和工作原理

首先在 InP 基片上进行扩散工艺为例,说明半导体的激光微细加工工艺。实验装置如图 1 所示,CO<sub>2</sub> 激光器输出的  $10.6\ \mu\text{m}$  激光束经反射镜 M,透镜 L<sub>2</sub> 聚焦后照射在表面已制备好含 Zn 的 SiO<sub>2</sub> 乳胶膜的 InP 基片 S 上,完成扩散结的写入。曝光区  $\Sigma$  面积数据,直径约为  $48\ \mu\text{m}$ 。温度测量系

统可测量曝光区  $\Sigma$  内各点的温度。通过扩散温度和扩散时间的调节,可控制扩散结的性能参数。可见温度测量对于控制扩散结的性能至关重要。

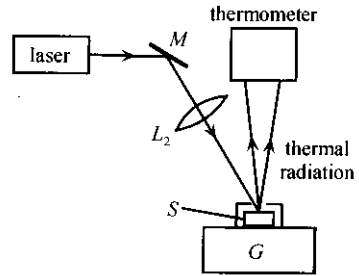


图 1 激光诱导扩散实验装置

Fig. 1 Experimental setup for laser induced diffusion

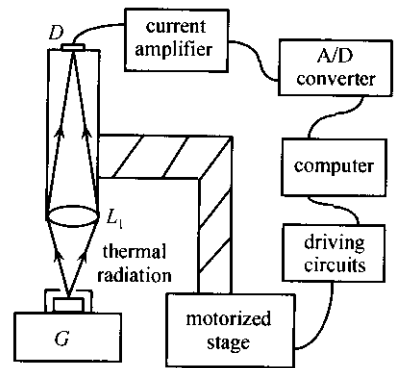


图 2 温度测量系统的实验装置

Fig. 2 Experimental setup for the temperature measurement system

温度测量系统的实验装置如图 2 所示。基片上  $\Sigma$  区受激光照射升温而发出较强的热辐射,由透镜 L<sub>1</sub> 将  $\Sigma$  中被测面积元的热辐射能会聚在光电探测器 D 的光敏面上,并通过 D 把  $\Sigma$  中测量点的热辐射转变为光电流,实际上也就是把  $\Sigma$  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<sup>[9]</sup>,可将数字量直接和温度对应。通过计算机控制二维电动平台移动,对最高温度点进行搜索,从而测出焦斑中心温度、热斑边界等参数。

合理地将曝光区  $\Sigma$  近似为灰体,其面发光率<sup>[9]</sup>

$$R = K\sigma T^4 \quad (1)$$

式中,  $K$  为被测基片在  $\Sigma$  区的平均发射本领,  $\sigma$  为 Stefan 常数,  $T$  为  $\Sigma$  中测量点的温度。进一步假设透镜接收到的辐射能全部会聚到探测器光敏面,则探测器 D 输出的光电流为<sup>[9]</sup>

$$I_p = R_l(T)K\sigma T^4 S_l S' / (\pi d_l^2) \quad (2)$$

式中,  $R_I(T)$  为探测器的电流响应率,  $S_1$  为透镜  $L_1$  的通光孔面积,  $S'$  为测量区域面积, 即  $\Sigma$  中与探测器  $D$  的光敏面共轭面元的面积,  $d_1$  为  $L_1$  到  $\Sigma$  的距离。  
(2) 式表明, 探测器  $D$  输出的光电流对温度的变化非常敏感, 只要对光电流有一定的分辨率, 就可达到较高的温度分辨率。显然, 这种辐射测温法也具有不接触测量的功能。

在系统中, 探测器  $D$  采用光敏面直径为  $70 \mu\text{m}$  的长波长  $1.55 \mu\text{m}$  InGaAs/InP 探测器。考虑到探测器输出信噪比和测量区域面积两方面的要求, 设计套筒结构和透镜焦距, 使透镜成像系统放大率  $\alpha = 4$ 。这样, 相应的测量区域直径约为  $18 \mu\text{m}$ 。需要指出的是, 透镜成像系统的作用不仅在于减小被测区域的面积, 而且还能大幅度提高接收到的被测区域的辐射能, 提高系统的灵敏度。

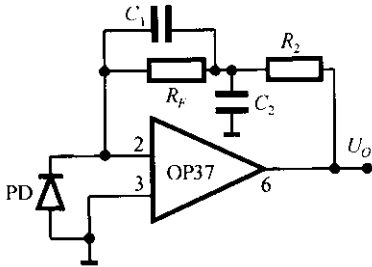


图3 电流放大器原理图

Fig. 3 Schematics of the current amplifier

电流放大器是由低噪声运算放大器 OP37 构成的直接反馈式电流放大器, 电路组成如图 3 所示。输出电压  $U_o$  和输入光电流  $I_p$  之间的关系为

$$U_o = I_p R_F \quad (3)$$

式中,  $R_F$  为反馈电阻, 在电路中取值为  $30 \text{ M}\Omega$ 。

A/D 转换器选用 AD1674A, 这是一种带有采样保持器的功能较全的 12 位 A/D 转换集成芯片。在电路中, 采用单极性工作方式, 输入电压信号范围为  $0 \sim 10 \text{ V}$ 。对应的转换精度为  $\pm 1.22 \text{ mV}$ 。

为了减小噪声, 采取了以下几项措施。首先, 在电流放大器电路中接入与反馈电阻  $R_F$  相并联的电容  $C_1$ 。同时, 光电探测器  $D$  和运算放大器 OP37 间采用同轴电缆连接。放大器电路的直流电源以及信号部分的布线应和  $50 \text{ Hz}$  的交流电源部分明显分开。计算机在采集数据时, 采用数据平均的办法。通过这些措施, 可使系统提高对光电流的分辨率, 即提高对温度的分辨率。

实验表明, 在输入光辐射恒定时, 系统显示数字量的变化为  $\pm 1$  位。如果不考虑系统噪声, 数字量

的变化为  $\pm 1$  位, 对应 A/D 转换器的输入电压变化为  $\pm 2.44 \text{ mV}$ , 再由 (3) 式, 可计算出对应的电流放大器输入光电流变化为  $\pm 0.08 \text{ nA}$ 。由此可见, 系统对光电流的分辨率优于  $0.1 \text{ nA}$ 。同时, 可由 (3) 式计算得系统允许的光电流信号范围为  $0 \sim 333.3 \text{ nA}$ 。而文献 [9] 中的系统对光电流的分辨率为  $1 \text{ nA}$ , 允许的光电流信号范围为  $0 \sim 120 \text{ nA}$ 。

假定聚焦激光束为高斯光束, 则曝光区  $\Sigma$  的圆心温度最高, 温度的分布是圆形对称的, 且温度随半径增加单调下降<sup>[10]</sup>。当用温度作为聚焦激光束写入的工艺参数时, 必须测出曝光区  $\Sigma$  最高温度点的温度。因为最高温度点没有找准确, 就无法确定曝光区  $\Sigma$  的实际温度。根据曝光区  $\Sigma$  温度分布的特点, 确定以下搜索最高温度点的方法, 如图 4 所示。

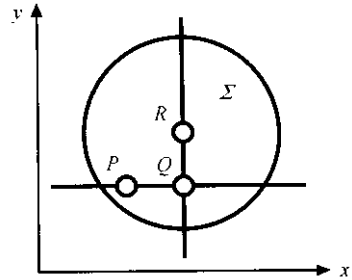


图4 搜索温度最高点的方法

Fig. 4 Method to find the point with the highest temperature

首先粗调电动平台使系统对准曝光区  $\Sigma$  内一点  $P$ , 然后使平台沿  $x$  方向移动, 搜索到一个温度最高点  $Q$ 。使系统对准这一最高温度点  $Q$ , 然后使平台沿  $y$  方向移动, 搜索到一个温度最高点  $R$ 。则  $R$  点为整个曝光区  $\Sigma$  内的温度最高点。而沿  $y$  方向得到的温度分布就可以表示曝光区  $\Sigma$  内的温度分布。

系统的响应速度主要取决于 A/D 转换器 AD1674A 的转换时间, 因此最短采样间隔约  $10 \mu\text{s}$ 。在连续波激光诱导扩散和合金等实验中, 需要在半导体基片上产生较稳定的温度分布。对温度分布的测量应在基片上的温度分布较稳定后进行, 此时对电动平台移动速度的要求并不十分严格, 系统中采用的电动平台最大移动速度为  $20 \text{ mm/s}$ , 能够满足使用要求。在脉冲激光微细加工时, 系统对温度分布的测量并不能在单个脉冲的情况下完成, 需要在多个激光脉冲照射的情况下进行, 而每个激光脉冲间的间隔时间较长<sup>[3]</sup>, 因此平台的移动速度也能满足要求。

### 3 实验结果

在进行实际温度测量之前,应对系统进行定标<sup>[9]</sup>,确定曝光区测量点的温度和计算机读数之间的关系,以便从计算机直接读出温度。定标结果如图 5 所示。从定标结果可看出,在温度为 600℃ 附近,系统的温度分辨率为 0.2℃。但由于探测器光电流和温度之间的非线性关系,在 400℃ 以下时,系统的温度分辨率仅为 1℃。利用计算机根据定标结果进行插值运算,就可在温度测量时,直接给出温度值。

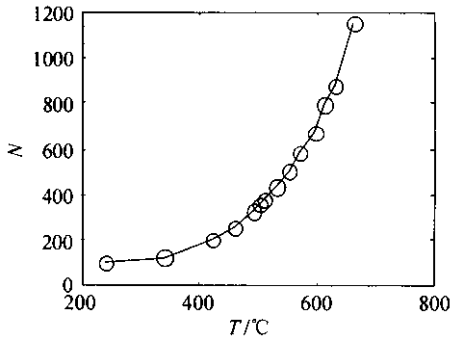


图 5 系统定标结果

Fig. 5 Results of the system calibration

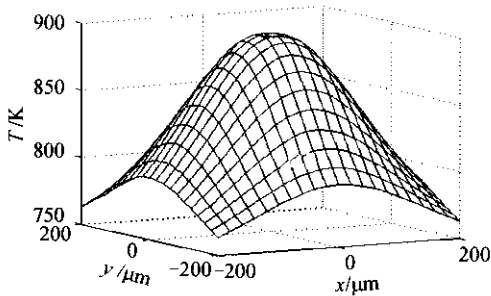


图 6 热斑的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of the heated region

用上述系统测量了功率为 15 W 的连续波 10.6  $\mu\text{m}$  聚焦激光束照射预热温度为 570 K 的 InP 时产生热斑的温度分布,电动平台移动的速度为 0.5 mm/s,结果示于图 6。温度分布中的最高温度为 897 K。同时可看出,热斑随半径有较大的温度梯度。

### 4 结 论

这套计算机温度测量系统可以方便地实时测量激光诱导扩散、激光诱导合金等激光微细加工中微小曝光区的温度分布,测量区域直径可小到 18  $\mu\text{m}$ ,在温度为 600℃ 附近,温度分辨率可达到 0.2℃。系统通过自动寻找曝光区的最高温度点提高了温度测量的准确性。由于有较快的响应速度和自动记录功能,该系统还可以方便地用于脉冲聚焦激光束写入中半导体基片的微小高温区温度不接触实时测量。

### 参 考 文 献

- 1 Ye Yutang. Laser Assisted Microprocessing [M]. The first edition. Chengdu: Press of University of Electronic Science and Technology, 1995  
叶玉堂. 激光微细加工[M]. 第一版. 成都:电子科技大学出版社,1995
- 2 A. Yu. Bonchik, S. G. Kijak, Z. Gotra *et al.*. Laser technology for submicron-doped layers formation in semiconductors [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**:589~591
- 3 Ye Yutang, Li Zhongdong, Hong Yonghe *et al.*. Pulsed Nd:YAG laser induced diffusion of Zn into GaAs using solid state diffusion source [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(4):419~422  
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[J]. *光学学报*, 1997, **17**(4):419~422
- 4 Ye Yutang, Li Zhongdong, Hong Yonghe *et al.*. Continuous wave CO<sub>2</sub> laser induced diffusion of Zn into GaAs using a solid state diffusion source [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(3):237~241  
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 CO<sub>2</sub> 激光诱导 Zn 扩散[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(3):237~241
- 5 D. J. Ehrlich, J. Y. Tsao. Submicrometer-linewidth doping and relief definition in silicon by laser-controlled diffusion [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**(3):297~299
- 6 P. Baumgartner, W. Wegscheider, M. Bichler *et al.*. Single-electron transistor fabricated by focused laser beam-induced doping of a GaAs/AlGaAs heterostructure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(16):2135~2137
- 7 Daniel Guidotti, John G. Wilman. Novel and nonintrusive optical thermometer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(5):524~526
- 8 B. Stritzker, A. Pospieszczyk, J. A. Tagle. Measurement of lattice temperature of silicon during pulsed laser annealing [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1981, **47**(5):356~358
- 9 Li Zhongdong, Ye Yutang, Hong Yonghe *et al.*. Remote sensing of the temperature of the exposed region in laser assisted diffusion [J]. *Journal of Applied Sciences*, 1997, **15**(4):413~417  
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
- 10 M. Lax. Temperature rise induced by a laser beam [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(9):3919~3924