

文章编号: 0258-7025(2005)05-0702-05

微小激光加工区辐射测温系统的调焦

吴云峰, 叶玉堂, 杨先明, 秦宇伟, 张雪琴

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 将红外辐射测温系统用于半导体基片表面温度测量时, 系统的调焦状况将影响测温结果的准确性。对这种影响进行了理论计算。结果表明, 当被测高温区面积较大时, 可以允许较大的调焦范围。但在激光诱导扩散等激光微细加工工艺中, 曝光区直径仅数十微米量级, 对系统的调焦提出了较高的要求。计算了在可见光波段和近红外波段两种情况下系统成像物镜的焦距。当成像物镜在波长为 $0.546 \mu\text{m}$ 时的焦距为 30 mm , 并固定像距为 196 mm 时, 得到在波长为 $1.335 \mu\text{m}$ 时的物距比波长为 $0.546 \mu\text{m}$ 时大 1.33 mm 。利用这个结果, 结合在不同物距时系统对被测高温区进行扫描得到的温度分布, 提出了调焦的方法。利用该方法, 系统物距可调节到最佳物距为中心 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 的范围内, 满足了微小面元温度测量的要求。

关键词 激光技术; 半导体; 辐射测温; 调焦

中图分类号 TN665 文献标识码 A

Focusing in Radiometric Temperature Measurement for Small Laser-Processed Region

WU Yun-feng, YE Yu-tang, YANG Xian-ming, QIN Yu-wei, ZHANG Xue-qing

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

Abstract The effects of focusing on the measurement precision of radiometric pyrometer have been analyzed. The results show that the larger of the high temperature region, the larger of the permissible focusing range. In experiment such as laser-induced diffusion, the diameter of the exposed region is only tens of microns. Therefore, the requirement of focusing is stringent. Then a focusing method was proposed to solve this problem. In the system used in the experiment, the image distance is fixed, and the focal length of the object lens is 30 mm at wavelength of $0.546 \mu\text{m}$. The calculated results suggested that the change of focal lengths at different wavelengths causes the change of objective distances obviously. Based on these calculated results and the measured temperature distributions of the same object at different objective distances, the objective distance can be adjusted in the range of $\pm 0.05 \text{ mm}$ around the ideal value, to meet the need of the radiometric temperature measurement for a small region.

Key words laser technique; semiconductor; radiometric temperature measurement; focusing

1 引言

辐射测温具有不接触测量、响应速度快等优点, 被广泛用于被测物体表面温度的测量以及瞬态温度测量^[1~5]。

在激光诱导扩散等半导体激光微细加工技术中^[6,7], 半导体基片表面微小曝光区的温度是非常

重要的工艺参量。目前对激光照射下半导体基片温度上升已经进行了很多理论计算^[8,9], 得到的结果对实验有一定的指导意义。但人们更希望能对微小曝光区的温度进行准确地测量与控制。已见报道的半导体基片温度测量系统几乎都是测量基片平均温度的, 并不能应用于微小激光曝光区(直径约数十微

收稿日期: 2004-02-09; 收到修改稿日期: 2004-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(60277008)、教育部重点科技项目(03147)和电科院及四川省科技厅资助课题(01GGP1904)资助项目。

作者简介: 吴云峰(1972—), 男, 重庆万州人, 博士研究生, 主要从事单片 OEICs 器件的激光微细加工技术研究。

E-mail: yfwu-72@163.com

米)的温度测量^[2]。一些针对激光加工区温度测量的系统只能达到250 μm 的空间分辨率^[3],也远远满足不了激光微细加工的要求。本课题组曾经报道过专门用于微小曝光区的红外辐射测温系统^[4,5],其理论空间分辨率达到18 μm 。

在实验中,发现测温系统的调焦状况对温度测量的准确性和温度分辨率都有较大的影响,在被测高温区面积较小时,影响尤为严重。本文通过理论计算分析了调焦对温度测量的影响,并根据使用的测温系统提出了有效的调焦方法。

2 激光微细加工区温度测量的原理

系统装置如图1所示^[5]。基片上曝光区受激光照射升温而发出较强的热辐射,由透镜 L_1 将曝光区中被测面元的热辐射能汇聚在探测器 D (InGaAs/InP PIN 探测器,响应波长1.0~1.6 μm)的光敏面上,并通过 D 把被测面元的热辐射转换为光电流,然后将光电流转换为数字信号输入计算机。

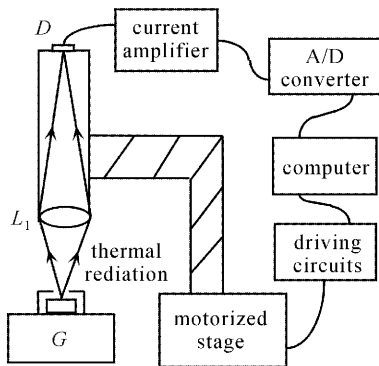


图1 温度测量系统的实验装置
Fig. 1 Experimental setup for the temperature measurement system

由于基片表面热斑的温度比环境温度高得多,因此将曝光区 Σ 近似为灰体,并进一步假设透镜接受到的被测面元(探测器光敏面的共轭面元)的辐射全部汇聚到探测器光敏面,则探测器 D 输出的光电流为^[4]

$$I_p = R_1(T)K\sigma T^4 S_1 S' / (\pi d_1^2), \quad (1)$$

式中, $R_1(T)$ 为探测器的电流响应率, K 为被测基片在 Σ 区的平均发射本领, σ 为斯特藩常数, T 为曝光区中测量点的温度, S_1 为透镜 L_1 的通光孔面积, S' 为测量区域面积,即 Σ 中与探测器 D 的光敏面共轭面元的面积, d_1 为 L_1 到基片表面的距离。

理论上,可以由式(1)用理论计算的方法由光

电流 I_p 求出温度 T ,但由于探测器光敏面的共轭面元(被侧面元)面积 S' 和发射本领 K 难于准确测定,电流响应率 $R_1(T)$ 是温度的函数,所以这种方法难以实现。实验中,可先用已知温度的基片对系统进行定标^[4],通过温度定标后,就可以根据光电流值计算出温度。

可以看出,测温原理要求基片表面和探测器光敏面为物像共轭关系,但事实上总是存在调焦误差,不可能严格地满足这一条件。因此必须解决两个问题,一是调焦误差对温度测量究竟有什么影响;二是如何尽可能减小调焦误差。

3 调焦误差对温度测量的影响

从测温原理看出,对同一被测高温区,探测器输出的光电流值由探测器光敏面处的光强分布 $I_i(x_i)$ 决定。因此,首先讨论调焦误差对 $I_i(x_i)$ 的影响。一个非相干线性空不变光学成像系统的性能可以用其强度脉冲响应函数来表征。对于一个像差校正系统,调焦误差与成像系统的强度脉冲响应函数密切相关。以下通过讨论测温系统中成像部分的像强度分布与系统强度脉冲响应函数之间的关系,来考察调焦误差对温度测量的影响。

合理地将测温系统中成像部分看作非相干线性空不变光学成像系统,其物像关系应满足卷积积分^[10](考虑到系统的圆对称性,只讨论一维情况)

$$I_i(x_i) = k I_g(x_i) * h_1(x_i), \quad (2)$$

式中 $*$ 表示卷积, I_g 是几何光学理想像的强度分布, I_i 为像强度分布, k 为常数(讨论中设为1), h_1 为强度脉冲响应函数(或称强度点扩展函数)。

由于主要关心强度脉冲响应函数的分布范围和理想像的强度分布范围,其所取的具体分布形式并不对我们的讨论产生太大的影响,为简单起见,首先假定理想像的强度分布为矩形分布,

$$I_g(x_i) = \begin{cases} 1, & |x_i/a| < 1/2 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (3)$$

同时假定 h_1 为三角分布,

$$h_1(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{b} \left(1 - \left|\frac{x_i}{b}\right|\right), & |x_i| \leq b \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (4)$$

需要说明的是,上面将理想像的强度分布假定为矩形分布更接近温度定标时的情况。当实际进行激光微细加工时,矩形分布与实际情况相差甚远,因此用下式表示这种情况下的理想光强分布

$$I_g(x_i) = \left[\frac{J_1(2.44\pi x_i/a)}{2.44\pi x_i/a} \right]^2, \quad (5)$$

其中 J_1 为一阶贝塞尔函数。将(3),(4)式代入(2)式,计算了 $a = 5b, a = 2b$ 及 $a = b$ 时的像强度分布,结果如图2(a)所示,将(5),(4)式代入(2)式,计算了 $a > 2b, a \leq 2b$ 时的像强度分布,结果如图2(b)所示。

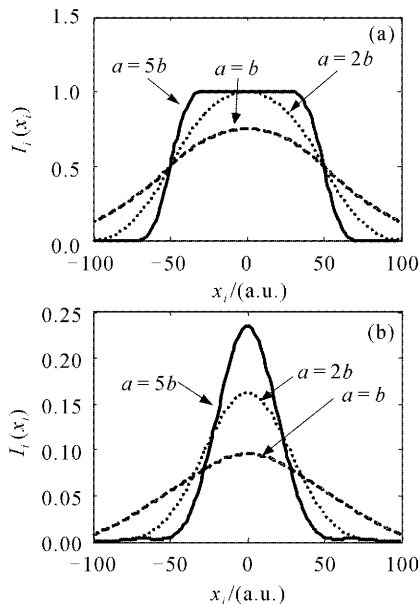


图2 理想像强度分布和强度点扩展函数分布具有不同关系时的像强度分布

(a) (3)式表示理想像强度分布;(b) (5)式表示理想像强度分布

Fig. 2 Image intensity distribution varies with different intensity point spread function

(a) Ideal image intensity distribution expressed by formula (3)

(b) Ideal image intensity distribution expressed by formula (5)

从图2可以看出:

1) 对同一高温区,只要 h_1 的分布区域面积小于或等于高温区理想像的面积,像的最高强度就不会改变。像强度分布显示,只是像的边缘部分强度降低。因此,对于大面积高温区的测量,如果只考察测得的最高温度,即使系统的 h_1 的分布区域面积较大(即有较大的调焦误差),测量结果也会保持不变。这可能是目前关于辐射测温系统的报道中,未见讨论调焦问题的原因(这些报道均针对大面积高温区的温度测量)。在我们做温度定标实验时,由于目标是大面积高温区,也从实验中观察到了这一现象。

2) 当理想光强为矩形分布时,对同一高温区,只要 h_1 的分布区域面积大于高温区理想像的面积,像的最高强度就会随 h_1 的分布区域面积增大而迅速下降。在调焦误差较大而高温区面积很小时,容

易出现这种情况。这时,必须使系统处于良好的调焦状态,以使 h_1 的分布区域面积小于或等于高温区理想像的面积。否则,即使使定标时的物距和测温时的物距完全一样,测得的温度值也总是低于基片表面的实际温度。

3) 在激光微细加工实验中,即使高温区理想像的分布面积远大于点扩展函数的分布面积,实际像的最高强度也会随点扩展函数分布区域面积的变化而迅速变化,这对调焦提出了更加苛刻的要求。

4) 考虑到探测器光敏面的面积,可以看出系统的强度脉冲响应函数和探测器光敏面面积决定了最小可测高温区的面积以及系统的空间分辨率。

4 系统的调焦方法

由于被测高温区的温度较低,因此使用的测温系统工作于不可见的近红外波段。在系统中,探测器光敏面离透镜 L_1 的距离(像距)是固定不变的,通过调整基片表面到透镜 L_1 的距离(物距)来完成调焦。针对这些特点,提出由粗调、修正及微调三步组成的调焦方法,满足了微小高温区温度测量的要求。

4.1 粗调

首先确定探测器光敏面所在位置,然后将探测器取下,调节物距,同时用肉眼观察基片表面处目标在探测器光敏面处的像,成像最清晰时,固定物距。

这里,首先需解决基片表面处目标的形成问题。由于基片表面非常光滑,即使用强光照明,散射光也非常弱,肉眼无法观察到基片表面的像。如果用别的物体置于基片表面处来调焦,又很难确定基片表面处的位置。因此,我们利用激光微细加工的特点,采用适当大小的激光强度,直接在基片表面形成直径仅数十微米的轻微损伤区,然后将此损伤区当作调焦的目标。从下面也可看出,这一微小目标的形成对于微调来说也是必不可少的。

人眼只对可见光波段敏感,而系统中探测器的响应波长为 $1.0 \sim 1.6 \mu\text{m}$,因此,即使在探测器光敏面处得到了清晰的可见光图像,由于透镜 L_1 材料的色散,相应的近红外图像还是不清晰。这是不能仅用这种方法调焦的主要原因。

4.2 修正

计算透镜 L_1 在可见光波段和近红外波段时的焦距,从而计算出在两个波段时物距的变化值。然后利用这个变化值,对粗调得到的物距进行修正,以获得更好的调焦效果。

合理假定 L_1 为薄透镜,其焦距 f' 为

$$f' = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{1}{1/r_1 - 1/r_2}, \quad (6)$$

式中 n 为材料折射率, r_1 和 r_2 分别为透镜两个球面的半径。对于同一透镜, r_1 和 r_2 是恒定不变的,因此可将式(6)写成

$$f' = K \cdot \frac{1}{n-1}, \quad (7)$$

其中, K 为常数。

考虑透镜的材料为 K9 玻璃,在波长为 $0.546 \mu\text{m}$ 时,焦距为 30 mm 。我们计算波长为 $1.335 \mu\text{m}$ 时透镜的焦距。对于 K9 玻璃,在波长为 $0.546 \mu\text{m}$ 时,折射率为 $1.51825^{[11]}$,由(7)式可计算出常数 $K=15.5475$;而在波长为 $1.335 \mu\text{m}$ 时,折射率为 $1.50246^{[11]}$,则其焦距为 30.945 。

系统中,像距固定为 196 mm 。物像关系满足高斯公式

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}, \quad (8)$$

式中 l' 和 l 分别是像距和物距。

将两个波长下的焦距代入(8)式,计算出相应的物距:波长为 $0.546 \mu\text{m}$ 时, $l = 35.42 \text{ mm}$;波长为 $1.335 \mu\text{m}$ 时, $l = 36.75 \text{ mm}$ 。可以看出,两者相差达 1.33 mm 。

在实验中用这个差值来修正物距,达到了更好的调焦效果。

4.3 微调

从调焦过程可以看出,通过理论计算出的修正值与实际情况总会有差别,而人眼判断的“最清晰”,其实因人而异,并不严格。因此,我们进一步通过比较系统对微小目标进行扫描得到的“温度”分布结果来判断最佳调焦状态。在图 1 所示系统中,计算机控制精密电动平台带动测温套筒移动并同时记录温度信号,可对基片上的热斑作二维扫描得到热斑的温度分布。对同一目标,在不同物距时进行温度扫描得到的曲线如图 3 所示。在图中, l_0 为粗调得到的物距,物距 $l=l_0+1.2 \text{ mm}$ 时,系统处于最佳调焦状态。从图中明显看出,粗调后,离理想调焦状况相差较远,而经过修正后已基本接近最佳调焦状态。图 4 是在修正后,通过微调在修正值附近得到的温度分布半峰全宽(FWHM)值,其中 l_0 为我们取的最佳物距。由图 4 可以看出,物距可调节到最佳物距为中心 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 的范围内。同时从该图发现,当物距和最佳调焦状态的物距相差同样的距离时,物距偏大对温度测量的影响比偏小时更大。这一点从图 3(a),(b)的比较也可

以看出。

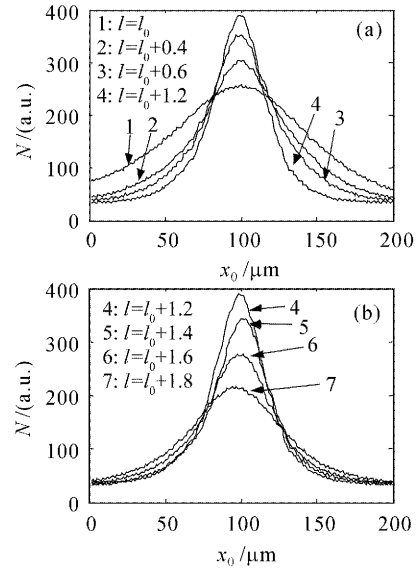


图 3 对同一微小目标,在物距不同时,系统扫描得到的强度分布

Fig. 3 Measured intensity distribution of the same small object varies with different objective distance

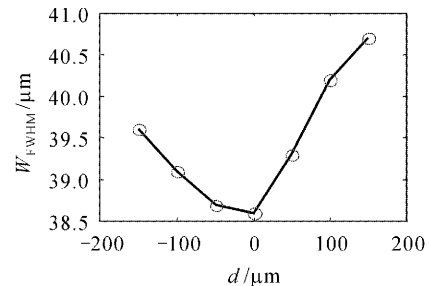


图 4 对同一微小目标,物距偏离最佳位置时,温度分布的半峰全宽($d=l-l_0$)

Fig. 4 FWHM of the measured intensity distribution of the same small object varies with different objective distance ($d=l-l_0$)

5 结 论

理论计算表明,辐射测温系统的最小可测高温区面积由成像部分的强度点扩展函数和探测器光敏面面积决定。因此,微小激光加工区的温度测量对成像部分的空间分辨率和系统调焦提出了较高的要求,这一点有别于较大面积高温区的辐射测温。由于系统中探测器的响应波长为不可见的近红外波段($1.0 \sim 1.6 \mu\text{m}$),我们提出了由粗调、修正及微调三步组成的调焦方法,使系统的调焦简单易行,并达到了较高的调焦精度,满足了激光微细加工区温度测量的要求。值得指出的是,本文的讨论虽然只针对

半导体激光微细加工技术中的测温需求而进行的,但同样适用于其他微小高温热斑的辐射测温。

参 考 文 献

- 1 Jian-hui Gu, Siu-Chung Tam, Yee-loy Lam *et al.*. Laser-induced temperature-rise measurement by infrared imaging [C]. *SPIE*, 2000, **3933**: 388~395
- 2 Y. H. Zhou, Z. M. Zhang, D. P. DeWitt *et al.*. Effects of radiative properties of surfaces on radiometric temperature measurement [C]. 9th Int. Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors-RTP', 2001. 179~188
- 3 M. Ignatiev, I. Yu. Smurov, G. Flamant *et al.*. Two-dimensional resolution pyrometer for real-time monitoring of temperature image in laser materials processing [J]. *Appl. Sur. Sci.*, 1997, **109/110**: 498~508
- 4 Li Zhongdong, Ye Yutang, Hong Yonghe *et al.*. Remote sensing of the temperature of the exposed region in laser assisted diffusion [J]. *J. 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
- 5 Wu Yunfeng, Ye Yutang, Wu Zeming *et al.*. Computer-controlled temperature measurement system for the small exposed region in laser assisted microprocessing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3): 363~366
吴云峰,叶玉堂,吴泽明等. 激光微细加工中微小曝光区域的计算机温度测量系统 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 363~366
- 6 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 μm 激光诱导扩散 [J]. *光学学报*, 1997, **17**(4): 419~422
- 7 Ye Yutang, Li Zhongdong, Hong Yonghe *et al.*. Continuous wave CO₂ 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 CO₂ 激光诱导 Zn 扩散 [J]. *中国激光*, 1997, **A24**(3): 237~241
- 8 Shen Zhonghua, Lu Jian, Ni Xiaowu. An analytical solution to the problem of laser-induced heating and melting of semiconductors [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(7): 632~636
沈中华,陆建,倪晓武. 强激光作用下半导体材料的加热与熔融的解析计算 [J]. *中国激光*, 1998, **A25**(7): 632~636
- 9 Tian Hongtao, Chen Chao. The analytical calculation of temperature distribution in doing processes of Zn/InP induced by continuous wave laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(2): 367~371
田洪涛,陈朝. 连续激光诱导 Zn/InP 掺杂过程中温度分布的解析计算 [J]. *物理学报*, 2003, **52**(2): 367~371
- 10 Shu Xianyu, Li Jitao. Information Optics [M]. Beijing: Science Press, 1999
苏显渝,李继陶. 信息光学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999
- 11 Li Xishan, Jiang Haiying, Jiang Anmin. Dispersion measurement of optical glass and discussion of the approximate calculation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(2): 206~211
李锡善,蒋海英,蒋安民. 光学玻璃的色散特性测量及近似计算方法的讨论 [J]. *光学学报*, 1995, **15**(2): 206~211