

文章编号: 0258-7025(2005)03-0327-04

激光诱导扩散区温度分布的均匀化

吴云峰¹, 叶玉堂¹, 王兵学², 杨先明¹, 秦宇伟¹

(¹ 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; ² 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 用连续波激光诱导扩散制作单片集成光接收机中的探测器时, 激光照射形成的高温区面积很小。当入射激光焦斑光强为高斯分布甚至“平顶帽形”分布时, 微小扩散区温度分布的均匀性都不能达到实验的要求。提出了用掩模对入射高斯光束进行空间调制的方法来实现扩散区温度的均匀化。该方法的关键是计算出实现均匀的温度分布所需要的焦斑光强分布参数。给出了计算方法和计算实例。结果表明, 均匀化后, 在扩散区平均温度上升值为 500 K 时, 扩散区内的最大温度差为 3.9 K, 并且高温区的温度分布接近“平顶帽形”。

关键词 激光技术; 激光微细加工; 单片集成光接收机; 激光诱导扩散; 温度分布均匀化

中图分类号 TN 665 **文献标识码** A

Flattening of Temperature Distribution in Laser Induced Diffusion Region

WU Yun-feng¹, YE Yu-tang¹, WANG Bing-xue², YANG Xian-ming¹, QIN Yu-wei¹

(¹ School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China)
(² The Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract In the fabrication of photodiode of monolithic integrated photoreceiver using laser induced diffusion, because the high temperature region is very small, when the intensity distribution of incident laser beam is Gaussian or uniform, the uniformity of the temperature distribution in the diffusion region cannot meet the requirement of uniformity. In this paper, a method to homogenize the temperature through modulating of the intensity incident on the surface using a mask is proposed. The key of this method is calculating the laser intensity distribution, which can induce uniform temperature rise in the diffusion region. The numerical method to solve this problem is described. The results show that when the mean temperature rise in the diffusion region is about 500 K, the maximum temperature difference of 3.9 K can be achieved, and the temperature distribution approaches “flatcap”.

Key words laser technique; laser assisted microprocessing; monolithic integrated photoreceiver; laser induced diffusion; flattening of temperature distribution

1 引 言

为解决单片集成光接收机制作工艺中的光电兼容问题, 用连续波激光诱导 Zn 扩散来形成探测器中的 $p-n$ 结^[1~5]。要得到具有良好性能的器件, 探测器光敏面的 Zn 浓度分布应尽量均匀。因此, 在激光诱导扩散过程中, 微小扩散区的温度分布应尽量均匀。另外, 由于要利用激光诱导扩散局域升

温的特点来制作单片集成光接收机, 因而希望在制作探测器时, 不影响接收机电路部分的性能, 这就要求高温区尽量只限于扩散区。因此, 理想的温度分布应为“平顶帽形”。但当入射激光束光强为高斯分布时, 激光照射引起的温度上升将随离激光焦斑中心的距离增加而迅速下降^[6], 扩散区的温度分布达不到实验要求。

目前, 人们在高斯光束均匀化方面开展了广泛

收稿日期: 2003-09-09; 收到修改稿日期: 2004-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(60277008)、教育部(03147)、电子科学研究所及四川省科技厅(01GGP1904)资助项目。

作者简介: 吴云峰(1972—), 男, 重庆万州人, 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: yfwu-72@163.com

的研究^[7~9],可以得到均匀的焦斑光强分布。但由于在连续波激光诱导扩散中,曝光区直径仅为数十微米,即使是具有均匀的焦斑光强分布,由于热传导等原因,曝光区的温度也会随离激光光斑中心的距离增加而较快地下降,不能实现扩散区温度分布的均匀化。本文提出用掩模对焦斑光强进行调制的方法来实现扩散区温度分布的均匀化。

2 计算方法

因为在单片集成光接收机中的 PIN 光探测器的制作中,所考虑的扩散深度小于 1 μm,我们只考察基片表面的温度分布。根据 M. Lax 的理论分析^[6],由于激光束照射引起的半导体基片表面的温升为

$$T_r = T_{\max} N(R, 0, W) = T_{\max} \int_0^{\infty} \frac{W}{F(\lambda)} d\lambda \int_0^{\infty} \frac{J_0(\lambda R) F(\lambda)}{W + \lambda} d\lambda, \quad (1)$$

式中

$$W = \alpha w, \quad R = r/w, \quad (2)$$

其中 r 为离激光焦斑中心的距离, w 为入射激光束的光斑半径, J_0 为零阶贝塞耳函数。这里,假定半导体基片对入射激光的吸收系数 α 为 $1/\mu\text{m}$ 。 T_{\max} 为在假定半导体基片对入射激光吸收非常强烈时 ($W \rightarrow \infty$), 在入射激光焦斑中心, 半导体基片表面处的温度上升。

式(1)中, $F(\lambda)$ 为入射激光焦斑光强分布 $f(R)$ 的贝塞耳变换

$$F(\lambda) = \int_0^{\infty} f(R) J_0(\lambda R) R dR. \quad (3)$$

定义一个参数 h 来表征所考察区域温度上升的均匀性

$$h = \frac{T_h - T_l}{T_m}, \quad (4)$$

式中 T_h 为所考察区域的最高温度上升值, T_l 为所考察区域的最低温度上升值, T_m 为所考察区域(在径向)的平均温度上升值

$$T_m = \frac{1}{R_i} \int_0^{R_i} T_{\max} N(R, 0, W) dR, \quad (5)$$

式中 R_i 为所考察区域(即扩散区)的半径。由式(4)可以看出, 参数 h 的值越小, 温度分布就越均匀。

当入射激光束光强为高斯分布和“平顶帽形”分布时, 据式(1)计算出的温度上升分布分别如图 1(a), (b)所示, 计算时取光斑半径 $w = 40 \mu\text{m}$ 。由图 1(a)可知, 如果取扩散区的半径为 $w/2$, 并假设扩

散区平均温度上升值为 500 K, 扩散区的温度差将达到 51.1 K, 远不能满足对扩散区温度均匀性的要求, 从图 1(b)可见, 扩散区的温度差为 28.7 K, 仍不能满足要求。

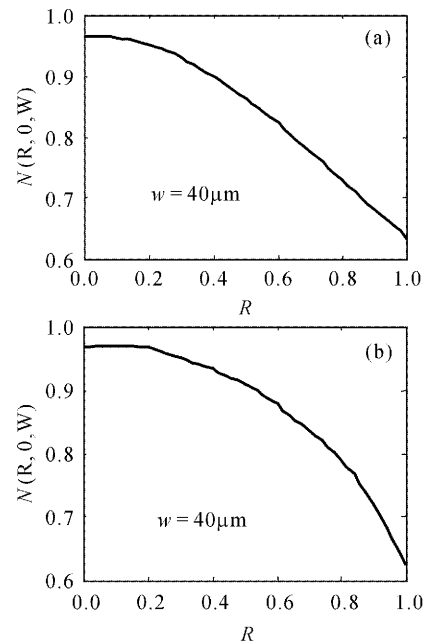


图 1 焦斑光强为高斯分布(a)和平顶帽形分布(b)时的温度上升图

Fig. 1 Temperature distribution when the beam focal intensity distribution is Gaussian (a) and “flatcap” (b)

为此, 提出用掩模对高斯光束进行空间调制, 以实现扩散区温度上升的均匀化。首先根据温度均匀化的要求计算出相应的激光焦斑光强分布, 然后再由得到的光强分布设计制作出掩模, 如果把该掩模置于聚焦透镜的前端, 就可以在扩散区得到均匀的温度上升了。可以看出, 这个方法的关键是实现均匀的温度上升分布所需要的激光焦斑光强分布。

经过如图 2 所示的掩模(假设掩模最外面的遮光带足够宽)调制后, 激光焦斑光强分布可表示为

$$f(R) = \begin{cases} 0, & R \in [0, r_1] \cup (r_2, r_3] \cup (r_4, r_5] \cup (r_6, \infty) \\ \exp(-R^2), & R \in (r_1, r_2] \cup (r_3, r_4] \cup (r_5, r_6] \end{cases} \quad (6)$$

我们可以寻找一组参数 $(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6)$, 使得温度均匀性参数 h 最小, 实现扩散区温度上升的均匀化。具体搜索过程如下:

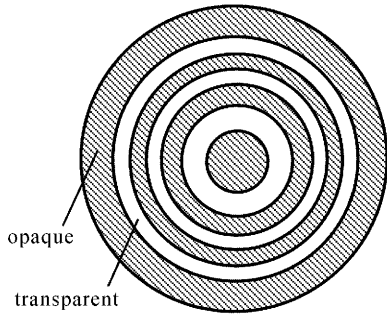


图 2 用来调制高斯光束的掩模
Fig. 2 Illustration of the mask used to modulate the incident Gaussian beam

- 1) 任意给定一组参数,将式(6)代入式(1),计算出温度上升的分布;
- 2) 计算出扩散区的平均温度上升值 T_m ;
- 3) 在扩散区寻找和平均温度上升值相差最大的点的位置 R_{max} ,该点的温度上升 T_a 及与该点相距最近的可调参数 r_i ;
- 4) 根据表 1 对 r_i 进行调整,表中的“1”表示条件成立,“0”表示不成立。 r_i 增加或减小一个固定值,在计算实例中设定为 0.01;
- 5) 根据调整后的参数,将式(6)代入式(1),计算出温度上升的分布;
- 6) 如温度上升分布满足均匀化要求 ($h < \epsilon, \epsilon$ 为设定值),则搜索结束,否则重复第(2)步到第(6)步。

表 1 调整 r_i 的方法
Table 1 Method of adjusting r_i

$R_{max} < T_a?$	$R_{max} \in [r_{2k-1}, r_{2k}],$ ($k = 1, 2, 3$)?	$r_i < R_{max}?$	Change of r_i
1	1	1	Increase
1	1	0	Decrease
1	0	1	Decrease
1	0	0	Increase
0	1	1	Decrease
0	1	1	Increase
0	0	1	Increase
0	0	0	Decrease

3 结果与讨论

根据上述方法进行了数值计算(计算中设 $w = 40 \mu\text{m}$),得到了参数 ($r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$) 的一组值:(0.04, 0.1, 0.3, 0.38, 0.5, 0.65),该组参数值对

应的光强分布(根据式(6))如图 3 所示,对应的温度上升分布如图 4 所示。从图 4 中知道,如果取平均温度上升为 500 K,则扩散区的温度差为 3.9 K,已经可以满足扩散实验要求。焦斑光强分布为高斯分布、“平顶帽形”分布及图 3 所示分布时,根据式(4)计算出对应的温度上升均匀性参数 h 分别为 $1.02 \times 10^{-1}, 5.74 \times 10^{-2}, 7.86 \times 10^{-3}$ 。用掩模对高斯光束进行空间调制的方法实现均匀化后,扩散区的温度均匀性比调制前提高了 2 个量级。同时,可以看出均匀化的温度分布明显更接近“平顶帽形”分布。

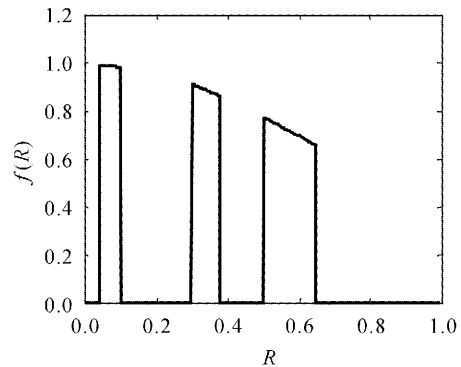


图 3 实现温度均匀化的焦斑光强分布图
Fig. 3 Focal intensity distribution for realizing the homogenization of temperature

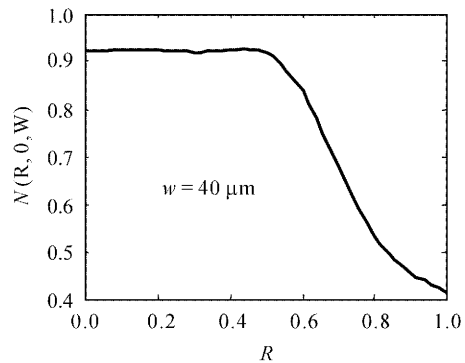


图 4 均匀化的温度上升分布
Fig. 4 Temperature distribution after homogenizing

图 5 给出了在上述光强分布参数不变的情况下, $w = 20 \mu\text{m}$ 和 $w = 60 \mu\text{m}$ 时相应的温度上升分布。这表明,改变焦斑半径 w ,温度分布会有所改变,但改变并不剧烈。计算也表明,改变吸收系数 α ,温度分布改变也较小;光强分布参数的微小变化也不会引起温度上升分布的剧烈变化。这意味着在实验时,掩模尺寸、焦斑半径及半导体基片对入射激光的吸收系数和设计值之间即使有误差,也不会对均匀化的效果产生大的影响。

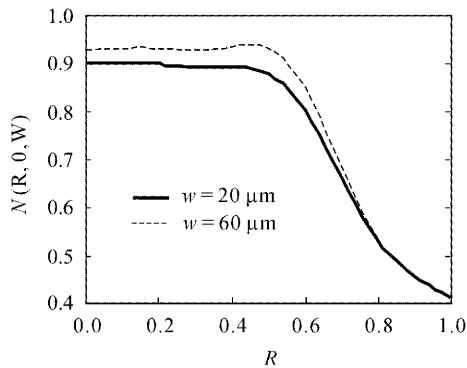


图5 均匀化后,改变焦斑尺寸得到的温度上升分布
Fig. 5 Temperature distribution after homogenizing
for different spot size

4 结 论

提出了采用掩模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。给出了实现均匀的温度上升分布需要的激光焦斑光强分布的计算方法,得到了使得温度上升分布均匀性满足扩散实验要求的焦斑光强分布。结果表明,在扩散区平均温度上升值为 500 K 时,扩散区内的最大温度差为 3.9 K,可以满足扩散实验要求。均匀化的温度分布接近“平顶帽形”分布。

参 考 文 献

- 1 Ye Yutang. Laser Assisted Microprocessing [M]. Chengdu: Press of University of Electronic Science and Technology, 1995
叶玉堂. 激光微细加工[M]. 成都:电子科技大学出版社,1995
- 2 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
- 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 μm 激光诱导扩散[J]. *光学学报*, 1997, **17**(4):419~422
- 4 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[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3):363~366
- 5 Wu Yunfeng, Ye Yutang, Wu Zeming *et al.*. Temperature rise on a semiconductor substrate locally heated by 10.6 μm laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7):870~874
吴云峰,叶玉堂,吴泽明等. 半导体基片在 10.6 μm 激光局域加热时的温度上升[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7):870~874
- 6 M. Lax. Temperature rise induced by a laser beam [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(9):3919~3924
- 7 Zhang Bin, Lü Baida, Xiao Min. Study of beam uniformity methods in indirect-driven laser fusion [J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, **47**(12):1998~2004
张彬,吕百达,肖敏. 激光间接驱动聚变的光束均匀化方案研究 [J]. *物理学报*, 1998, **47**(12):1998~2004
- 8 Zheng Xuezhe, Wang Ling, Yan Yingbai *et al.*. Design binary optics elements for ICF uniform illumination with hybrid optimization method [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(3):265~269
郑学哲,王凌,严瑛白等. 实现 ICF 均匀照明的二元光学器件的混合优化设计[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(3):265~269
- 9 Tian Kehan, Yan Yingbai, Tan Qiaofeng. Two kinds of improvement on Yang-Gu algorithm for the design of diffractive optical element used for beam shaping [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):307~312
田克汉,严瑛白,谭峭峰. YG 算法设计衍射光学光束整形器件的两种改进[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(4):307~312