

文章编号: 0258-7025(2004)07-0870-05

## 半导体基片在 10.6 $\mu\text{m}$ 激光局域加热时的温度上升

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, 四川 成都 610054)

**摘要** 在激光诱导扩散等激光微细加工技术中,需要用聚焦激光束照射基片表面,以形成局部高温区。为使局部高温区的温度分布满足实验要求,对 10.6  $\mu\text{m}$  聚焦连续波  $\text{CO}_2$  激光束照射下半导体基片的温度上升进行了数值计算。计算中考虑了基片材料对 10.6  $\mu\text{m}$  激光的吸收系数随温度的变化。计算得到了温度上升与基片预热温度、入射激光束功率及曝光面积等参数的关系。结果表明,基片初始温度为室温及激光焦斑直径小于 100  $\mu\text{m}$  时,激光照射形成稳定高温区的最高温度不超过 600 K。增加基片初始温度,可以在建立满足要求的温度上升的同时,减小基片上高温区分布的面积。在同一初始温度下,在基片高温区分布的面积符合实验要求的前提下,应尽量使用较大的光斑尺寸和激光功率,从而使基片表面热斑的温度分布更易控制。

**关键词** 激光技术;激光微细加工;半导体;温度上升

**中图分类号** TG 665 **文献标识码** A

## Temperature Rise on a Semiconductor Substrate Locally Heated by 10.6 $\mu\text{m}$ Laser Beam

WU Yun-feng, YE Yu-tang,  
WU Ze-ming, YANG Xian-ming, QIN Yu-wei  
(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science  
and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract** In laser assisted microprocessing, such as laser induced diffusion, the substrate is irradiated by a focused laser beam. And a high temperature region is formed on the substrate surface. To acquire the desired temperature distribution, the temperature rise in a semiconductor substrate induced by 10.6  $\mu\text{m}$  focused continuous wave (CW)  $\text{CO}_2$  laser beam has been investigated numerically. The temperature-dependent absorption coefficients of the substrate material are incorporated in the calculation model. The relations between the temperature rise and parameters such as the preheating temperature, the power of the laser beam and the beam width have been obtained. It is shown that when the substrate is in room temperature before the irradiation and the diameter of the focused laser beam is smaller than 100  $\mu\text{m}$ , the highest stable temperature on the substrate can not exceed 600 K. It is also shown that increasing the preheating temperature can reduce the size of high temperature region, when the induced temperature rise is kept to meet the requirement. Under the condition that the temperature distribution meets the experimental requirement, the laser spot size and the power of the incident laser beam should be adopted as large as possible in order to make the control of the temperature distribution easier.

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

收稿日期: 2003-03-03; 收到修改稿日期: 2003-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60277008)、电子科学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@std. uestc. edu

## 1 引言

激光诱导扩散等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泛的应用<sup>[1]</sup>。

在激光诱导扩散实验中,扩散系数随温度变化非常剧烈,因此扩散区域的温度是重要的工艺参数,需要准确控制<sup>[2]</sup>。由于基片的温度上升对激光功率、曝光区大小以及半导体基片的预热温度都很敏感,因此有必要研究基片的温度上升与它们之间的关系。

目前,已有很多关于激光照射下半导体基片温度上升的理论分析和数值计算的报道<sup>[3~7]</sup>。但在大多数报道中,并没有考虑基片吸收系数随基片温度的变化。而事实上,由于 Si, GaAs 及 InP 等半导体基片对 10.6  $\mu\text{m}$  波长的光的吸收机制主要是自由载流子吸收,自由载流子浓度又与温度密切相关,所以基片吸收系数会随着温度剧烈地变化。在这种情况下,半导体基片的温度上升规律和吸收系数为常数时相比会有很大区别。文献[8]中考虑了 Si 的热传导率和吸收系数随温度的变化,研究对象也是 Si 在 CW CO<sub>2</sub> 激光照射下的温度上升,但由于它是解决激光退火的问题,假定了激光束光斑半径远大于基片厚度,以及入射到基片表面的激光功率是均匀的,只考虑了一维的情形,这与我们的实验条件不符。在文献[9]的分析中,激光束的强度分布可为高斯型,并将半导体基片视为半无限的,和我们的实验最接近,但它也是把吸收系数当作常数来处理的。

我们在文献[9]的基础上,考虑了半导体基片的吸收系数随温度的变化,通过数值计算,详细讨论了基片的温度上升与激光功率、曝光区大小以及半导体基片的初始温度之间的关系。

## 2 计算理论

合理地假设入射激光为高斯光束,半导体基片的厚度和半径都远大于光斑半径,并且热传导率为常数,暂时假定半导体基片的吸收系数也为常数,则由于激光束照射引起的基片表面的温升为<sup>[9]</sup>

$$T_r = \frac{P}{2\pi^{1/2} K w} \cdot \frac{W}{(1/2)\pi^{1/2}} \cdot \int_0^\infty J_0(\lambda R) \cdot \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{1}{4}\lambda^2\right) \cdot \frac{1}{W + \lambda} d\lambda \quad (1)$$

式中,  $P$  为入射激光束的功率;  $K$  为基片的热传导

率;  $w$  为入射激光束的光斑半径; 而

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

其中,  $\alpha$  为基片对入射激光的吸收系数,  $r$  为离激光光斑中心的距离。从式(1)可知,温升  $T_r$  是吸收系数  $\alpha$  的函数,因此可将式(1)写为

$$T_r = f(\alpha) \quad (3)$$

从式(1)可以看出,在吸收系数  $\alpha$  为常数的情况下,可以方便地通过调整入射激光功率来获得理想的温度上升。

但事实上,由于 Si, GaAs 及 InP 等半导体基片对 10.6  $\mu\text{m}$  波长的光的吸收机制主要是自由载流子吸收,自由载流子浓度又与温度密切相关,所以基片吸收系数会随着温度剧烈地变化。M. R. T. Siregar 等<sup>[10]</sup>的研究表明,自由载流子浓度随温度的变化可分为三个阶段。在低温时,自由载流子由杂质部分电离,浓度较低,并随温度上升而增加;随着温度的上升,杂质全部电离,自由载流子浓度基本保持不变;当温度上升到一定值时,将热激发产生电子-空穴对,在这个阶段,自由载流子浓度将会随温度上升迅速增加。因此,随着温度增加,吸收系数会增大。文献[10]还给出了吸收系数随温度变化的实验结果。

由于实际上吸收系数  $\alpha$  将随基片温度升高而增加,因此不能直接根据式(1)计算基片的温度上升,必须采用其他方法。为此,首先定性分析基片温度随激光束照射时间上升的过程。当基片受到激光束照射后,温度会开始上升,而温度上升又会导致吸收系数的增加,吸收系数的增加又进一步促使温度上升。这个过程会一直持续下去,直到在某一温度值时达到平衡,此时,由于吸收系数增加引起的吸收热量的增加和由于温度上升引起的散热减小相抵消,温度便稳定在这一点。但是,温度能否在实验需要的范围内达到稳定,与激光功率、曝光区大小以及半导体基片的初始温度等实验条件密切相关。

在激光诱导扩散实验中,需要以一定的激光功率  $P_s$  和激光光斑半径  $w_s$  建立起稳定的温度分布,并在这个温度下进行较长时间的扩散。考虑在建立起稳定温度分布后,基片表面各点的温度恒定,并近似地认为在激光照射区各点的吸收系数相同(实验表明光斑半径内温度变化不大),如果知道此时的吸收系数  $\alpha_s$ , 就可以根据式(1)计算出基片表面的温度上升。因此问题转化为如何求解一定  $P_s$  和  $w_s$  下的  $\alpha_s$ 。

如果不考虑吸收系数随温度的变化,则在一定

$P_s$  和  $w_s$  时,由式(1),当基片具有不同吸收系数  $\alpha$  时,光斑中心的基片表面的温度也不同,即

$$T = T_0 + f(\alpha) \quad (4)$$

式中,  $T_0$  为基片未用激光束照射前的初始温度。由式(4),也可将  $\alpha$  表达成  $T$  的函数

$$\alpha = f^{-1}(T - T_0) \quad (5)$$

另一方面,可由实验的方法测定半导体基片的吸收系数  $\alpha$  随温度的变化<sup>[10]</sup>,将实验结果表示为

$$\alpha = g(T) \quad (6)$$

对相同的  $T$ ,由式(5)和(6)计算得到的  $\alpha$  一般并不相同,但在建立稳定温度分布时,它们的值是相同的,因为如果不同,基片温度将继续升高。因此可由方程

$$f^{-1}(T - T_0) = g(T) \quad (7)$$

解得建立稳定温度分布时基片表面的中心温度  $T$ , 以及相应的吸收系数  $\alpha_s$ 。由于曝光区与温度分布区比较小很多,因此可以近似由  $\alpha_s$  及式(1)求出基片表面的温度分布。同时由式(7)也可看出,基片的初始温度对基片的温度上升将产生很大的影响。

### 3 计算结果与讨论

以 Si 为例,用上述方法进行计算。Si 在 10.6  $\mu\text{m}$  波长的实验吸收曲线可以用下面的公式表示<sup>[8]</sup>

$$\begin{aligned} \alpha &= g(T) = \\ &\exp(5 \times 10^{-6} T^2 + 2.635 \times 10^{-4} T + 1.4986) \end{aligned} \quad (8)$$

半导体基片的热传导率取平均值,即

$$K = 0.5 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$$

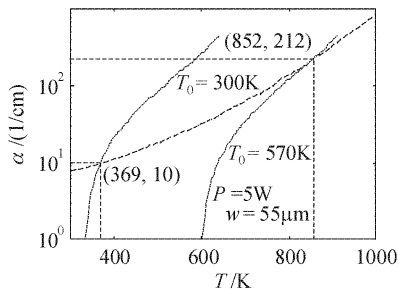


图1 建立稳定温度分布时吸收系数的数值解  
Fig. 1 Illustration of the solution of the absorption coefficient when the temperature distribution is stable

图1为当入射激光功率  $P = 5 \text{ W}$ ,光斑大小  $w = 55 \mu\text{m}$  时,用数值计算的方法求解式(7)的结果。其中实线为据式(5)做出的曲线,虚线为据式(8)做出的曲线,两条曲线的交点即为式(7)的解。图1中

画出了初始温度  $T_0$  为 300 K 和 570 K 两种情况。在  $T_0$  为 300 K,基片温度稳定时,吸收系数  $\alpha = 10 \text{ cm}^{-1}$ ,光斑中心温度  $T = 369 \text{ K}$ ,温度上升了 69 K;在  $T_0$  为 570 K,基片温度稳定时,吸收系数  $\alpha = 212 \text{ cm}^{-1}$ ,光斑中心温度  $T = 852 \text{ K}$ ,温度上升了 282 K。可见,在不同初始温度下,基片在相同功率、相同光斑大小的激光束照射下产生的温升幅度并不相同,初始温度越高,温度上升的幅度越大。

当入射激光功率  $P = 5 \text{ W}$ ,光斑大小  $w = 40 \mu\text{m}$ ,初始温度  $T_0 = 570 \text{ K}$  时,由图2可知,在 600~1000 K 之间,据式(5)和(8)作出的两条曲线并无交点,即式(7)在这个范围内无解。说明在这样的人射功率、光斑大小及初始温度条件下,将不能在 600~1000 K 的温度范围内建立稳定的温度分布。实验中,要求基片温度在 930 K 以下,因此,在下面的讨论中,把不能在 600~930 K 的温度范围内建立稳定温度上升的情形,简称为不能建立稳定温度上升。

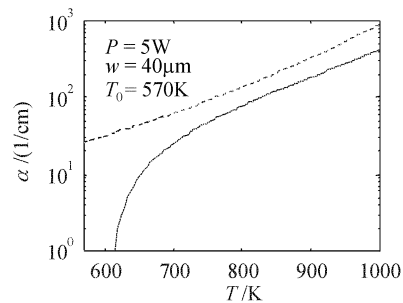


图2 温度在 600~1000 K 之间,式(7)无解的示意图  
Fig. 2 No solution exists of Eq. (7) for temperature between 600 and 1000 K

图3为基片初始温度为 300 K 时,不同激光功率下,基片表面光斑中心温度与光斑尺寸的关系。由图中可看到,对于同样的光斑半径  $w$ ,基片温度上升随光功率增加非线性地增加。但变化的规律和式(1)有所区别,在式(1)中,温度上升和入射激光功率是线性关系。对于相同的人射激光功率,基片温度上升随光斑半径减小而增加。

重要的是,对于恒定的光斑半径存在一个光功率的阈值,在这个阈值附近,温度上升随入射激光功率剧烈变化。功率大于阈值时,不存在稳定的温度上升。同样,对于恒定的入射激光功率,也存在一个光斑半径的阈值。当光斑半径小于阈值时不存在稳定的温度上升,这就意味着基片温度将随激光照射时间持续增加,直到超出实验允许的范围。

另外,从图3看出,当光斑半径为 50  $\mu\text{m}$  时,能

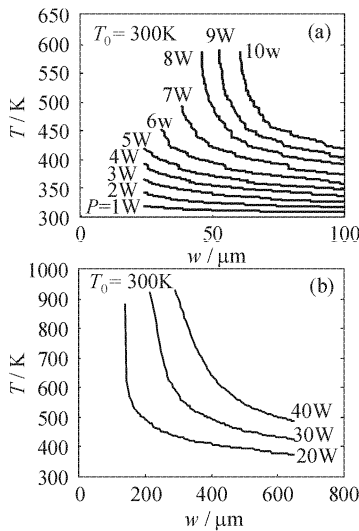


图 3 基片初始温度为 300 K 时,不同激光功率下,温度与光斑半径的关系

Fig. 3 Temperature rise  $T$  at the beam center versus the beamwidth  $w$  and the total incident power  $P$  when the initial temperature  $T_0$  is 300 K

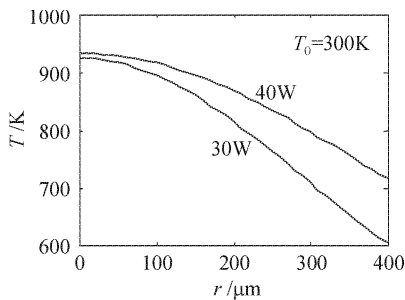


图 4 基片初始温度为 300 K 时,在不同激光功率下,光斑半径取最小允许值时,基片表面的温度分布

Fig. 4 Temperature rise  $T$  versus the radial distance from the center of the beam and the total incident power  $P$  when initial  $T_0$  is 300 K

建立的稳定温度上升最高也不超过 600 K。增加光斑半径和入射激光功率可以使稳定的温度上升增加,如图 3(b)所示,当  $P$  为 30 W 和 40 W 时,能在 930 K 以下的温度范围建立稳定的温度分布。但这样大的光斑半径下,基片热斑的温度分布范围太大,如图 4 所示,已经不能满足实验中“局域加热”的要求。

从图 5 可以看出,当光斑半径为 50 μm 时,稳定温度上升已能达到 930 K。类似于图 3 的阈值现象仍然存在,但在光斑半径为 100 μm 附近时,可以通过调节入射激光束功率来获得实验需要的温度上升,并使功率小于阈值,获得较为稳定的工作点。如

果光斑半径选得更大一些,调节就更容易;如果减小光斑半径,功率就必须接近阈值,调节就会较困难。事实上由于入射激光功率的不稳定,不可能在阈值功率附近获得稳定的温度分布。同时发现,当光斑半径减小为 24 μm 时,能达到的稳定温度上升也仅为 800 K。

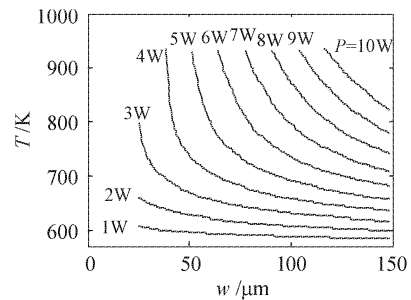


图 5 基片初始温度为 570 K 时,不同激光功率下,温度与光斑半径的关系

Fig. 5 Temperature rise  $T$  at the beam center versus the beamwidth  $w$  and the total incident power  $P$  when the initial temperature  $T_0$  is 570 K

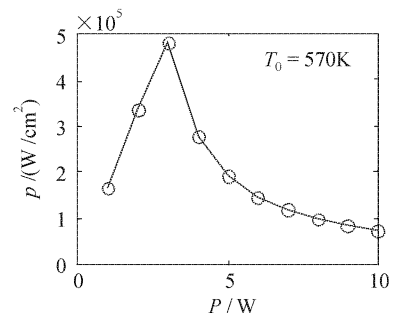


图 6 基片初始温度为 570 K 时,在不同功率下,可取光功率密度的最大值

Fig. 6 Largest permitted power density  $p$  versus the total incident power  $P$  when  $T_0$  is 570 K

图 5 中,当激光功率  $P$  为 1 W 和 2 W 时允许的最小光斑半径受实验系统限制,为  $w = 24 \mu\text{m}$ 。将这两条曲线除开,从如图 6 可看出,允许的最大光功率密度随激光功率增加而减小。图 6 同时表明,达到相同的温度对较小的光斑半径来说需要更高的激光功率密度,高的激光功率将导致温度不易稳定。

从图 7 可看出,热斑随激光功率增加而增大。和图 4 比较,发现提高基片初始温度后,建立相同的稳定温度时,需要的激光功率较小,所允许的光斑半径随之减小,可得到较小的热斑。

由于 Si, GaAs 及 InP 等半导体基片对 10.6 μm 波长的光的主要吸收机制都是自由载流子吸收,上

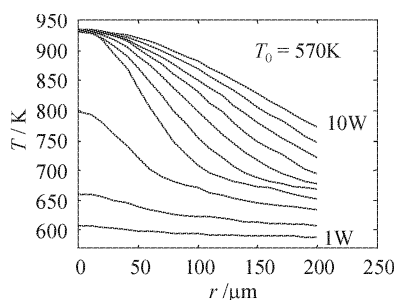


图7 基片初始温度为 570 K 时,在不同激光功率下,光斑半径取最小允许值时,基片表面的温度分布  
Fig. 7 Temperature rise  $T$  versus the radial distance from the center of the beam and the total incident power  $P$  when  $T_0$  is 570 K

述结果应和 GaAs 及 InP 等在激光照射下的升温规律类似。我们测量了 InP 基片在激光照射下的升温。激光器输出功率为 10 W,固定光斑半径,当初始温度为 630 K 时,热斑中心温度上升 232 K;当初始温度为 580 K 时,热斑中心温度上升就只有 170 K。上述光斑半径不变,当初始温度为 300 K 时,即使激光器输出功率达 20 W,基片的温度仍低于 600 K,不能满足激光微细加工实验的要求。在初始温度为 300 K,光斑半径较小时,调节激光器输出功率,发现基片温度不能被调节到 900 K 附近,要么较低,要么激光照射区的温度迅速上升,使得基片材料熔化。这和计算结果中显示的升温规律相似。

## 4 结 论

在考虑吸收系数随基片温度变化的情况下,计算了 Si 在连续波 10.6  $\mu\text{m}$  聚焦激光束照射下引起的温度上升。结果表明在半导体基片上建立符合要求的温度分布需要合适的预热温度、激光功率及曝光面积。当基片初始温度为室温时,建立满足要求的稳定温度上升能允许的最小光斑半径较大,要求的激光功率也较高,这使得基片热斑温度分布的面积较大,无法满足实验中局域升温的要求。增加基片初始温度,可以在建立满足要求的温度上升的同时,减小基片热斑温度分布的面积,以满足实验要求。在同一初始温度下,在基片热斑温度分布的面积符合要求的前提下,应使用较大的光斑尺寸和激

光功率,因为这会使基片的温度更易控制。由于 Si, GaAs 及 InP 等半导体基片对 10.6  $\mu\text{m}$  波长的光的主要吸收机制都是自由载流子吸收,因此得到的结果对 GaAs 及 InP 等在激光照射下的升温规律也有参考价值。这些结果对改善激光诱导扩散等激光微细加工工艺有重要意义。

## 参 考 文 献

- Ye Yutang. Laser Assisted Microprocessing [M]. 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
- 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
- N. Arnold, P. B. Kargl, D. Bäuerle. Laser direct writing and instabilities: a one-dimensional approach [J]. *Appl. Surface Science*, 1995, **86**:457~465
- P. Loza, D. Kouznetsov, R. Ortega. Temperature distribution in a uniform medium heated by linear absorption of a Gaussian light beam [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(18):3831~3836
- M. K. Loze, C. D. Wright. Temperature distributions in semi-infinite and finite-thickness media as a result of absorption of laser light [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(2):494~507
- 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):632~635  
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):632~635
- Tian Hongtao, Chen Chao. Analytical calculation of temperature distribution in the process of doping of Zn into InP induced by pulsed laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):755~758  
田洪涛,陈朝. 脉冲激光诱导 Zn/InP 掺杂过程中温度分布的解析计算[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):755~758
- Shen Jinxuan, Qu Fengyuan. A solid-phase epitaxy model for CW CO<sub>2</sub>-laser annealing of ion-implanted silicon [J]. *Chinese J. Semiconductor*, 1983, **4**(1):56~63  
沈金萱,屈逢源. 离子注入硅片的 CW CO<sub>2</sub> 激光退火固相外延模型[J]. *半导体学报*, 1983, **4**(1):56~63
- M. Lax. Temperature rise induced by a laser beam [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(9):3919~3924
- M. R. T. Siregar, W. Lüthy, K. Affolter. Dynamics of CO<sub>2</sub> laser heating in the processing of silicon [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**(10):787~788