

文章编号: 0253-2239(2004)12-1638-5

10.6 μm 激光诱导扩散中热致破坏的抑制*

吴云峰 叶玉堂 杨先明 秦宇伟 焦世龙
(电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

摘要: 在半导体激光诱导扩散实验中,用连续波 CO_2 10.6 μm 激光聚焦后照射基片表面。为实现局部区域的选择扩散,激光光斑半径仅数十微米。要使曝光区温度达到扩散实验要求,必须使曝光区功率密度很高。另一方面, Si、InP 等半导体材料对 10.6 μm 波长激光的吸收系数随温度的升高而增大,这导致实验时容易产生热致破坏,损伤基片。在分析热致破坏的产生机理后,提出了在聚焦激光束照射下,曝光区温度的数值计算方法。计算结果表明,在半导体基片初始温度为室温时,以恒定功率的激光束照射基片,曝光区温度不能稳定在扩散试验需要的温度范围。在此基础上,提出了预热基片及对曝光区温度进行实时控制等抑制热致破坏的方法,有效地克服了这一困难。这对于用激光微细加工制作出高性能的单片光电集成电路(OEICs)器件有重要意义。

关键词: 激光光学; 激光微细加工; 单片光电集成电路; 激光诱导扩散; 热致破坏

中图分类号: TN2 文献标识码: A

The Elimination of Thermal Runaway in 10.6 μm Laser-Induced Diffusion

Wu Yunfeng Ye Yutang Yang Xianming Qin Yuwei Jiao Shilong
(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science
and Technology of China, Chengdu 610054)

(Received 26 September 2003; revised 18 March 2004)

Abstract: In the experiment of 10.6 μm continuous wave CO_2 laser induced diffusion, the substrate is irradiated by a focused laser beam. To realize selective diffusion in local region, the diameter of the laser beam spot on the surface of the semiconductor substrate is only about dozens of microns. Because temperature rise of the exposed region must meet the requirement of diffusion experiment, high power density of the incident laser beam is necessary. On the other hand, the 10.6 μm light absorption coefficient of semiconductors such as Si, InP increases with the rising of temperature. The above two factors can easily lead to a thermal runaway phenomenon. The mechanism of thermal runaway was analyzed, then a numerical method was proposed to calculate the relation between the temperature of the exposed region and the power density of the incident laser beam. When the semiconductor substrate is kept at room temperature before the laser irradiation, it is shown that the temperature of the exposed region cannot be induced steadily to the value required in the diffusion experiment by using irradiation of laser beam with constant power. This problem can be avoided by preheating the substrate and real-time controlling the temperature of the exposed region.

Key words: laser optics; laser assisted microprocessing; monolithic optoelectronic integrated circuits; laser-induced diffusion; thermal runaway

* 国家自然科学基金(60277008)、教育部重点科技项目(03147)和中国电力科学研究院及四川省科技厅资助课题。

E-mail: yfwu-72@163.com

收稿日期:2003-09-26;收到修改稿日期:2004-03-18

1 引 言

考虑到在工作频率、信噪比、功耗、体积、可靠性等方面日益苛刻的要求,单片光电集成电路是信息技术进一步发展的必由之路。但在制作单片光电集

成电路器件时, 电器件和光器件的工艺难以兼容, 光、电两种器件的性能也就很难兼顾。由于激光诱导扩散具有“直接写入”、“低温处理”等独特的优越性^[1~3], 将该技术应用于单片光电集成电路的制做, 有望解决其光电兼容问题。

在连续波 CO_2 10.6 μm 激光诱导扩散中, 利用聚焦激光束加热表面覆有含 Zn 的 SiO_2 乳胶膜的 InP 基片, 基片表面曝光区的温度会由于激光照射而升高, 根据扩散定律, 在曝光区 Zn 将向基片内扩散形成一定的掺杂浓度分布。在实验中发现, 当基片温度为室温时, 存在一个入射激光束功率的阈值, 当低于此阈值时, 曝光区温度达不到扩散实验需要的值; 增加入射激光功率到阈值时, 将出现热致破坏现象, 即曝光区温度随照射时间迅速增加, 直至损坏基片。因此, 难以得到满足实验要求的曝光区温度值。本文研究了热致破坏的产生机理, 并对在聚焦激光束照射下, 半导体基片表面曝光区的温度上升进行了数值计算。根据数值计算的结果, 提出了抑制热致破坏的方法。这对改进激光诱导扩散工艺有重要意义。

2 热致破坏的产生机理

InP 基片对 10.6 μm 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

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

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)式可以看出, 吸收系数 α 与自由载流子浓度 N 成正比。Siregar 等^[4] 的研究表明, 自由载流子浓度 N 随温度的上升而增加。因此, 随着温度增加, 吸收系数会增大。

在激光开始照射基片时, 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得吸收系数增大, 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的增加相等时, 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的基片初始温度、曝光区面积和入射激光束功率时各不相同。在一定条件下, 温度上升过程(在不损坏基片的温度范围内) 将不能达

到平衡点, 出现热致破坏现象, 即温度持续上升并损坏基片。

3 曝光区温度随入射激光束功率的变化规律

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^[5~8]。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。本文在文献^[5]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, 得到了曝光区温度随入射激光束功率的变化规律。

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, 热传导率为常数, 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激光焦斑中心的温升为^[5]

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

式中 P 为入射激光束的功率, K 为基片的热传导率, ω 为入射激光束的光斑半径; 而

$$W = \alpha\omega, \quad (3)$$

其中 α 为基片对入射激光的吸收系数。

从(2)式可以看出, 在吸收系数 α 为常数的情况下, 可以通过调整入射激光束功率来获得理想的温升。但实际上吸收系数 α 将随基片温度升高而增加, 因此不能直接由(2)式计算基片的温升。

在激光诱导扩散中, 需要用功率 P_s 和光斑半径 ω_s 的激光来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不再变化, 并近似的认为在激光照射区各点的吸收系数相同, 如果知道此时的吸收系数 α_s , 就可以根据(2)式计算出基片表面的温升。

在不考虑吸收系数随温度变化的情况下, 在一定 P_s 和 ω_s 时, 由(2)式, 可将 α 表达成光斑中心的基片表面温度 T 的函数

$$\alpha = f(T - T_0), \quad (4)$$

式中 T_0 为基片在激光束照射前的初始温度。

另一方面, 可由实验的方法测定半导体基片的吸收系数 α 随温度的变化^[2], 将实验结果表示为

$$\alpha = g(T), \quad (5)$$

对相同的 T , 由(6)式和(7)式计算得到的 α 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。因此可由方程

$$f^{-1}(T - T_0) = g(T), \quad (6)$$

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 α_s 。然后可近似由 α_s 及 (2) 式求出基片表面的温度分布。

需要指出的是,由于条件不同,假定吸收系数为恒定值所得到的温度上升表达式会和 (2) 式有区别,但是并不影响本方法的使用。

由于 Si, GaAs 及 InP 等半导体基片对 $10.6 \mu\text{m}$ 波长激光的主要吸收机制都是自由载流子吸收,在计算中利用了文献 [4] 给出的 Si 基片对 $10.6 \mu\text{m}$ 光波的吸收系数随温度变化的实验结果。图 1 中给出了光斑(曝光区)半径 $\omega = 50 \mu\text{m}$, 基片初始温度 T_0 取 300 K 和 570 K 时曝光区温度和入射激光功率的关系曲线。从图 1 中可以看出,当初始温度 T_0 取 300 K 时,曝光区能达到的最高稳定温度仅 589 K,此时入射激光功率为 11.4 W。当试图进一步增加入射激光功率以提高曝光区温度时,就会产生热致破坏。提高基片的初始温度后,在曝光区获得相同的温度上升,需要的激光功率小得多。曝光区能达到的最高稳定温度为 979 K,此时入射激光功率仅为 5.1 W。同时发现,当曝光区温度在 800 K 时,入射激光功率为 4.47 W,小于破坏阈值约 0.6 W,可以获得满足扩散实验要求的稳定温升。

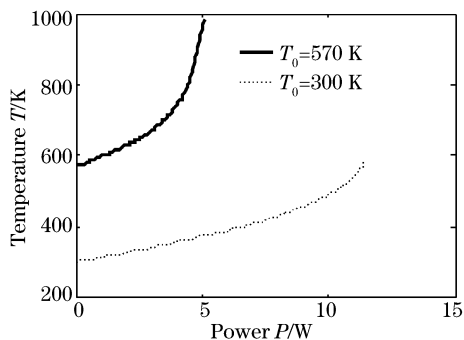


Fig. 1 The relationship between the temperature of the exposed area and incident laser power calculated by numerical method

4 抑制热致破坏的方法

4.1 预热基片

根据上述计算结果,首先采用了提高基片初始温度的方法来抑制热致破坏。为此设计了专门的加热台对半导体基片进行加热,以提高基片初始温度。实验中,将激光器输出功率调到 10 W, InP 基片的预热温度调到 580 K,得到的温升结果如图 2 所示。

需要注意的是,由于聚焦光学系统和基片表面对激光的反射,折射到基片中的激光功率仅 4 W 左右。从图 2 中可以看出,实验结果与理论计算结果较吻合。同时发现,虽然通过这种方法可以得到满足实验要求的温升幅度,但必须仔细调节入射激光功率,稍有不慎,还是会发生热致破坏的现象。从图 1 也可以看出这一点。图 1 中,当曝光区温度在 800 K 时,入射激光功率和破坏阈值之间虽然有约 0.6 W 的差值,但实验表明,当 InP 基片的温度在 870 K 左右时,基片材料就明显开始分解,即实际的破坏阈值功率仅 4.7 W。这个值仅比使曝光区温度上升到 800 K 时需要的入射激光功率值大 0.1 W,因此调节激光器输出功率时容易发生热致破坏。而且,即使暂时通过调整入射激光功率得到了满足实验要求的温升幅度,由于入射激光束功率、环境温度等因素的不稳定,也可能产生热致破坏。

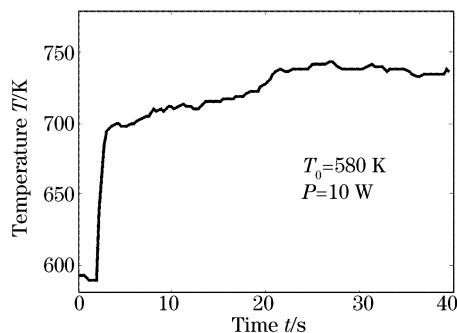


Fig. 2 Temperature rise of the substrate when the initial temperature is 580 K

4.2 采用电动快门实时控制入射激光的照射时间

在对基片进行预热的基础上,进一步提出如下抑制热致破坏的方法:当激光开始照射后,实时测量扩散区温度 T ,当 T 到达温度设定值时,停止激光照射;然后重复这一过程。这样 T 虽然随时间变化,但是不会超过设定值,因此不会产生热致破坏。设计了如图 3 所示的实验装置。加热台可作三维调节控制曝光区面积,同时对基片进行预热。热电偶测温仪用来测量基片初始温度。计算机温度测量装置可对扩散区温度进行实时测量^[9],计算机控制的电磁快门可对入射激光束进行控制。

保持和图 2 相同的曝光区面积和预热温度,将激光器输出功率调到 11.5 W,但利用快门对入射激光束进行控制,得到的温度-时间曲线如图 4 所示。温度设定值为 760 K,在快门关闭后,延时 10 s 再打开快门。图 4 表明,在整个温度控制过程中,只有一部分时间扩散区为高温,这会使得扩散实验的时间

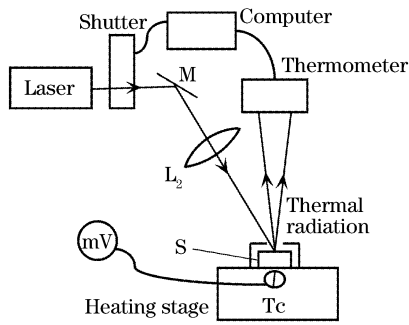


Fig. 3 Experimental setup for the control of laser irradiation by a shutter

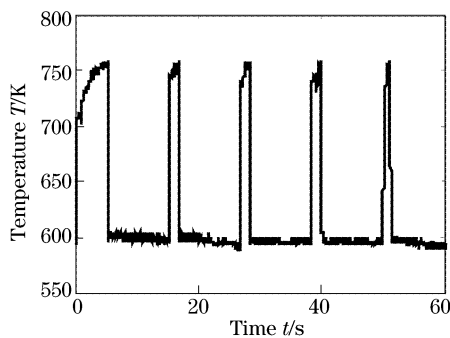


Fig. 4 The temperature rise of the substrate when the laser irradiation is controlled by a shutter

延长。但是由于温度得到了控制,在较小光斑时,也可以进行扩散实验。

同时从图 4 中可以看出,每次打开快门后,温度上升不完全相同,特别是第一次照射,温度上升较缓。以后各次照射温度上升基本相似。但快门关闭后的延时时间根据入射激光功率应调节,如果延时时间太短,随着激光照射次数的增加,照射时温度上升会变快,以致无法进行温度控制。

采用这种方法后,虽然降低了对激光器输出功率和基片预热温度的调节要求,并在一定程度上避免了热致破坏,但曝光区的温度在整个扩散实验过程中剧烈变化。为了更好的控制扩散区的参量,以获得更好的器件性能,曝光区温度在实验中希望保持稳定。为达到这一目的,并彻底避免热致破坏现象的发生,研制了下述曝光区温度自动控制系统。

4.3 用电动可调光阑对曝光区温度进行自动控制

在图 3 所示实验装置中,将电磁快门换为电动可调光阑,并更换相应的驱动电路,同时根据设计的控制策略编制计算机控制程序,就构成了曝光区温度自动控制系统。电动可调光阑由步进电机(36BF003 型)和可调光阑(孔径从 1 mm 到 12 mm 可调)组成。应用电动可调光阑可调节入射激光功率在较大范围内变化。系统控制框图如图 5 所示,

从图中可看出这是一个闭环直接数字控制系统。控制过程将使曝光区的温度以一定的控制精度稳定在设定值。系统中,电动可调光阑作为执行机构,同时具有数模转换的作用。而温度测量装置完成反馈信号的模数转换。

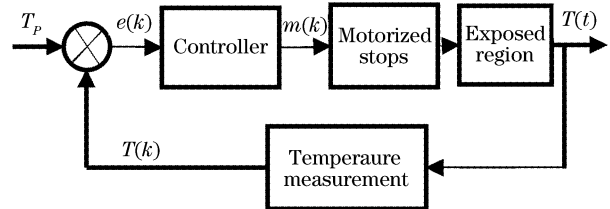


Fig. 5 Schematics of the temperature control system

由于步进电机是积分元件,并考虑到应消除控制作用频繁动作,我们采用带死区的增量型积分算法,死区由实验确定。算法表示式为

$$\Delta m(k) = K_i e'(k), \quad (9)$$

式中

$$e'(k) = \begin{cases} e(k), & |e(k)| > |e_0| \\ 0, & |e(k)| \leq |e_0| \end{cases} \quad (10)$$

(10) 式中, e_0 为死区值。为了提高系统响应速度,减小超调,对上述积分算法进行了改进。在对温度上升规律进行研究的基础上,用专家控制策略,利用计算机的实时计算能力,针对不同的误差值,实时选用不同的积分增益 K_i 。

保持和图 4 实验相同的激光聚焦状况和基片预热温度,但将激光器输出功率调到 13.5 W,用本系统进行温度控制,得到的温度-时间曲线如图 6 所示。温度设定值为 756 K。从图 6 可以看出,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 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。由于控制系统根据曝光区温度值实时调整入射激光束功率,因此避免了热致破坏。将图 6 和图 2 比较,可以看出采用了温度自动控制方

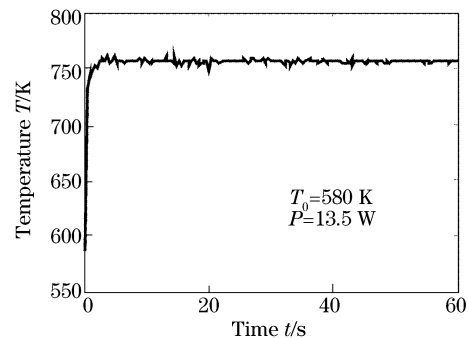


Fig. 6 The temperature of the exposed region changes with the time irradiated by the laser beam under temperature control

法后,曝光区温度的稳定度得到了很大改善,完全可以满足扩散实验的要求。

结论 在 10.6 μm 连续波 CO_2 激光诱导扩散实验中,发现很容易发生热致破坏现象。分析后认为,这是由于 Si, GaAs 及 InP 等半导体基片对 10.6 μm 波长激光的主要吸收机制都是自由载流子吸收,从而导致半导体基片对激光的吸收系数随温度上升而增加所造成的。提出了激光照射引起的基片温度上升值的计算方法。计算结果与实验观察较吻合。

根据理论计算结果,提出用对基片进行预热的方法来抑制热致破坏,使曝光区温度满足实验要求。但实验结果表明,虽然通过这种方法可以得到满足实验要求的温度上升幅度,但必须仔细调节入射激光功率,稍有不慎,还是会发生热致破坏的现象。因此,在对基片进行预热的基础上,进一步提出对曝光区温度进行实时测控的方法来抑制热致破坏。利用温度测量装置的实时测温能力,采用建立在温升规律之上的控制策略,可以方便地对曝光区温度进行实时控制,并很好地抑制热致破坏。温度的控制同时使我们可以使用尽量小的曝光区面积。降低了对基片预热温度和激光功率稳定性的要求,增大了激光功率和预热温度的可调节范围。这为方便激光微细加工实验,提高实验中的工艺参量的控制精度,进而制作出高性能的器件打下了坚实的基础。

参 考 文 献

- 1 Ye Yutang. *Laser Assisted Microprocessing* (激光微细加工) 1st ed., Chengdu: Press of University of Electronic Science and Technology, 1995 (in Chinese)
- 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* (光学学报), 1997, **17**(4): 419~422 (in Chinese)
- 3 Ye Yutang, Li Zhongdong, Hong Yonghe *et al.*. Continuous wave CO_2 laser induced diffusion of Zn into GaAs using a solid state diffusion source. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(3): 237~241 (in Chinese)
- 4 Siregar M R T, Lüthy W, Affolter K. Dynamics of CO_2 laser heating in the processing of silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**(10): 787~788
- 5 Lax M. Temperature rise induced by a laser beam. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(9): 3919~3924
- 6 Loze M K, Wright C D. Temperature distributions in semi-infinite and finite-thickness media as a result of absorption of laser light. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(2): 494~507
- 7 Tian Hongtao, Hen Chao. Analytical calculation of temperature distribution in the process of doping Zn into InP induced by pulsed laser. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(8): 755~758 (in Chinese)
- 8 Shen Zhonghua, Lu Jian, Ni Xiaowu. An analytical solution to the problem of laser-induced heating and melting of semiconductors. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(7): 632~635 (in Chinese)
- 9 Wu Yunfeng, Ye Yutang, Wu Zeming *et al.*. Computer-controlled temperature measurement system for the small exposed region in laser assisted microprocessing. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2004, **31**(3): 363~366 (in Chinese)