

激光输出不稳定性对激光与物质热作用的影响

魏学勤 郑启光 汪洪海 李再光

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要 研究了激光与物质相互作用中激光输出不稳定性对材料中温度场分布的影响以及减少这种影响的途径。首次在激光热传导方程中引入噪声项, 推导了噪声影响下该激光热传导方程的解。研究发现, 温度场的分布受噪声的影响, 材料表面温度的涨落较大, 而材料的深处涨落较小; 温度场的涨落还和激光加热的过程有关, 随激光加热时间的增长, 温度场的涨落增大。此外, 材料的热传导系数、热扩散率和发射率均对温度场的涨落有影响。文中还提出了减小激光输出不稳定性影响的几条途径。

关键词 激光热传导方程, 高斯白噪声, 温度涨落, 激光与物质热作用。

1 引 言

目前, 关于噪声驱动系统的随机动力学已有了很大的发展。国内外的学者们分别对高斯白噪声和色噪声的情况作了大量的研究^[1-8]。激光器谐振的过程中, 要受量子噪声及泵浦噪声的影响^[6-8]。关于量子噪声及泵浦噪声对激光输出的影响, 已有了较成熟的研究结果。量子噪声及泵浦噪声的存在, 使激光器输出的激光束稳定性下降。

在激光表面热处理中, 如激光表面强化、激光表面非晶化及激光表面熔覆中, 激光输出功率的不稳定性对热处理结果有影响^[9]。实际上, 在以上的热处理工艺中, 激光输出功率的不稳定性造成材料中温度场分布的涨落, 从而影响表面处理的结果。尤其在激光微细加工中, 如场效应管(MOS)管器件的制作、太阳能电池的制作、超大规模集成电路(VLSI)的研制及激光退火等领域中, 更应考虑激光输出不稳定性对工艺的影响^[10-12]。因此, 为了能更精确地控制激光热作用的温度, 研究激光输出的不稳定性对材料中温度场分布的影响已变得十分紧迫。

本文从均匀热源加热半无限大物体的模型出发^[13, 14], 在该模型的热传导方程中引入噪声项, 推导了噪声影响下材料中温度场的分布。

2 高斯白噪声影响下材料中的温度场

在激光与材料相互作用的热转换理论中, 最简单的办法是将激光束当作一个均匀的热源

去加热半无穷大物体。此时,材料内部和表面的热流满足如下的关系^[13]:

$$f = -K \partial T / \partial z \quad (1)$$

其中 K 为材料的热传导系数; T 为材料中的温度分布; z 为离材料表面的距离。 f 满足^[13]:

$$k \partial^2 f / \partial z^2 = \partial f / \partial t, \quad z > 0, \quad t > 0. \quad (2)$$

其中 k 为热扩散率, 并有 $k = K / c\rho$, c 和 ρ 分别为材料的比热和密度。考虑到激光输出的不稳定性^[9], 将激光的功率密度看作一常数 F_0 和一高斯白噪声源之和, 则有:

$$f = \epsilon F(t) = \epsilon F_0 + \epsilon \zeta(t), \quad x = 0, \quad t > 0. \quad (3)$$

其中 ϵ 为材料的发射率; F_0 为入射激光的平均功率密度, 为一常数。 $\zeta(t)$ 为高斯白噪声, 满足以下的统计关系^[1, 2, 6, 7]:

$$\langle \zeta(t) \rangle = 0, \quad \langle \zeta(t) \zeta(t') \rangle = 2D\delta(t - t') \quad (4)$$

式中 D 为噪声强度。这样, 进入到材料表面的热流中就考虑了涨落现象。由文献[13]可以得到如下的温度分布函数:

$$T(z, t) = \frac{k^{1/2}}{K \pi^{1/2}} \int_0^t \epsilon [F_0 + \zeta(\tau)] \exp(-z^2/4k\tau) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}} = \\ \frac{\epsilon k^{1/2}}{K \pi^{1/2}} \int_0^t F_0 \exp(-z^2/4k\tau) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}} + \frac{\epsilon k^{1/2}}{K \pi^{1/2}} \int_0^t \zeta(\tau) \exp(-z^2/4k\tau) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}} \quad (5)$$

(5) 式可进一步写成:

$$T(z, t) = \frac{2\epsilon F_0}{K} \left[\left(\frac{kt}{\pi} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{z^2}{4kt}\right) - \frac{z}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{kt}}\right) \right] + \\ \frac{\epsilon k^{1/2}}{K \pi^{1/2}} \int_0^t \zeta(\tau) \exp\left(-\frac{z^2}{4k\tau}\right) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}} \quad (6)$$

式中等号右边第二项中有噪声项 $\zeta(t)$, 可见温度场有涨落出现。对(5)式两边取平均, 得温度的平均值为:

$$\langle T(z, t) \rangle = \frac{2\epsilon F_0}{K} \left[\left(\frac{kt}{\pi} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{z^2}{4kt}\right) - \frac{z}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{kt}}\right) \right] \quad (7)$$

取:

$$T_0(z, t) = \frac{2\epsilon F_0}{K} \left[\left(\frac{kt}{\pi} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{z^2}{4kt}\right) - \frac{z}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{kt}}\right) \right] \quad (8)$$

$$\sigma(z, t) = \frac{\epsilon k^{1/2}}{K \pi^{1/2}} \int_0^t \zeta(\tau) \exp\left(-\frac{z^2}{4k\tau}\right) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}} \quad (9)$$

故(6)式变为:

$$T(z, t) = T_0(z, t) + \sigma(z, t) \quad (10)$$

(10) 式的右边第一项 $T_0(z, t)$ 为激光输出无涨落时加热材料的温度分布, 和文献[13]中的结论一致。第二项则为涨落项, 表明温度出现不稳定变化。

3 结 论

由(6)式可以看到, 温度分布由两部分组成。其中第二项为由入射激光的涨落引起的温度场的变化。由于这一项的存在, 温度场出现涨落。

由(7)式可知, 温度场分布的平均值为 $T_0(z, t)$, 是激光输出稳定(无涨落)时加热材料的

温度分布。在均匀热源加热半无穷大物体热源模型的热传导方程中，考虑噪声项以后，噪声不影响温度的平均值，而只是影响材料中温度的涨落。

由(9)式可以看出，温度的涨落和坐标 z 有关：

1) 当 $z \rightarrow \infty$ 时， $\sigma(z, t) = 0$ 。这说明当激光照射到材料表面以后，在材料的深处由于激光输出不稳定性所造成的温度场的涨落趋于零。即在材料深处的温度场受激光输出涨落的影响很小。2) 当 $z \rightarrow 0$ 时， $\sigma(z, t)$ 取最大值。这说明当激光照射到材料表面以后，材料表面的涨落为最大。

由此可知，温度的涨落项 $\sigma(z, t)$ 和坐标 z 的函数关系中， $\sigma(z, t)$ 随 z 的增大而减小。以铝和铜为例，计算机随机模拟了铝和铜以激光(不稳定)作为加热热源时铝和铜中温度场的分布及其涨落，如图 1 所示。其中铝和铜的各项参数列于表 1^[15]。

Table 1.

	thermal diffusivity $k / (\text{cm}^2/\text{s})$	thermal conductivity $K / (\text{W}/\text{cm} \text{ } ^\circ\text{C})$
aluminum	1.03	2.36
copper	1.19	4.01

由图 1 中可以直观的看到以上分析的正确性。

激光照射到材料表面后，在材料表面很薄的一层中被吸收，从而引起材料表面一层的温度很高。故在激光表面强化等工艺过程中，材料表面温度的变化有重要的意义。现在知道在材料的表面温度的涨落最大。温度的涨落必然影响工艺的水平。可见降低激光输出不稳定性对材料表面强化技术有重要的意义。

由(9)式还可以看出，温度场的涨落项 $\sigma(z, t)$ 还和材料的热扩散率 k 有关。当材料的热传导系数 K 不变时，温度场的涨落随 k 增大而增大。由图 2 所示的计算机随机模拟的结果，可明显的看到这一点。同样由(9)式可以看出，当 k 不变时温度场的涨落随热传导系数 K 的增

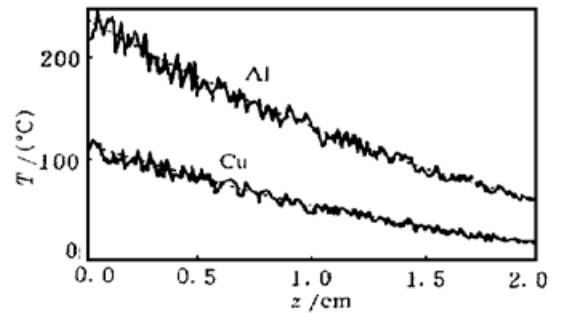


Fig. 1 The temperature T vs the depth z of material. Where $F_0 = 2 \text{ KW}/\text{cm}^2$, $\epsilon = 0.15$, $t = 2.0 \text{ s}$. The power density fluctuated between (1750 ~ 2250) W/cm^2 . — for the temperature that the laser beam is fluctuated; — for the temperature that the laser beam is stable

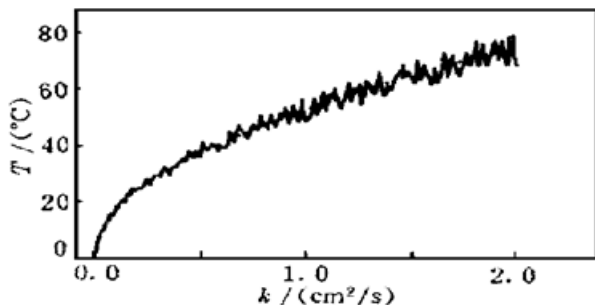


Fig. 2 The temperature T vs the thermal diffusivity k . Where $F_0 = 1 \text{ kW}/\text{cm}^2$, $\epsilon = 0.15$, $t = 2 \text{ s}$, $K = 4.01 \text{ W}/\text{cm} \text{ } ^\circ\text{C}$. The power density fluctuated between (900~ 1100) W/cm^2 . — for the temperature that the laser beam is fluctuated; — for the temperature that the laser beam is stable

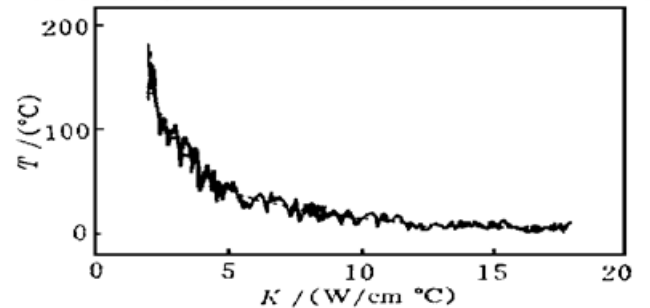


Fig. 3 The temperature T vs the thermal diffusivity K . Where $F_0 = 1 \text{ KW}/\text{cm}^2$, $\epsilon = 0.15$, $t = 2 \text{ s}$, $k = 1.19 \text{ cm}^2/\text{s}$. The power density fluctuated between 600~ 1400 W/cm^2 . — for the temperature that the laser beam is fluctuated; — for the temperature that the laser beam is stable

大而减小。如图 3 所示的计算机模拟也证明了这一点(为了显示清楚,图 3 中功率密度的涨落在计算中有意取得很大)。这说明材料中的温度涨落还和材料的特性密切相关。在激光与物质相互作用时,对于热扩散率 k 小,热传导率 K 大的材料,温度场的涨落小。在实践中,采用 k 小、 K 大的材料有助于减小温度的涨落,便于温度的精确控制。仍以图 1 中所示的铝和铜的温度场的分布为例,铝和铜的热扩散率 k 只相差 0.16,热传导系数 K 却相差近两倍。由图 1 中可见铜中温度场的涨落要比铝中要小,正说明了这一点。以上关于 k 和 K 的讨论是在假设发射率 ϵ 相同的情况下得出的。在实际应用中,还应该考虑发射率 ϵ 的不同带来的影响。

发射率 ϵ 对温度场涨落幅度的影响是显而易见的。从(9)式中可见温度的涨落项 $\sigma(z, t)$ 和发射率 ϵ 成正比。图 4 的计算机随机模拟可直观地看到随发射率 ϵ 增大,温度的涨落增大。

最为有意思的是温度场的涨落和激光加热的过程有关。图 5 为以铝和铜为例计算机随机模拟温度和加热时间的函数关系图。从中可以看到随激光加热时间的增加,温度涨落的幅度大幅度增加。这说明了在激光与物质相互作用中,采用大功率激光器,快速加热物体可使材料中温度的涨落降低。实际的激光加工过程中,激光与物质的相互作用时间很短。图 5 中为了能清晰的反映温度的涨落趋势,而有意将时间加长。

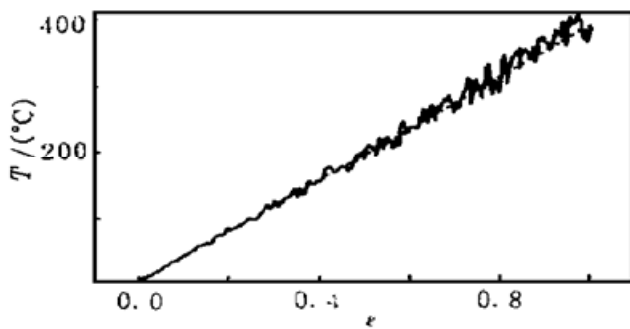


Fig. 4 The temperature T vs the absorptivity ϵ . Where $F_0 = 1 \text{ KW/cm}^2$, $t = 2.0 \text{ s}$, $K = 4.01 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$, $k = 1.19 \text{ cm}^2/\text{s}$, $z = 10^{-5} \text{ cm}$. The power density fluctuated between (900 ~ 1100) W/cm^2 . — for the temperature that the laser beam is fluctuated; — for the temperature that the laser beam is stable

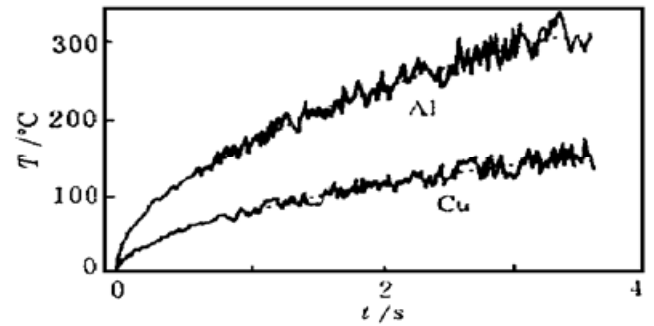


Fig. 5 The temperature T vs. the laser-solid interaction time t . Where $F_0 = 2 \text{ KW/cm}^2$, $\epsilon = 0.15$, $z = 0$, $k = 1.03 \text{ cm}^2/\text{s}$, $K = 2.36 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$. The power density fluctuated between (1700 ~ 2300) W/cm^2 . — for the temperature that the laser beam is fluctuated; — for the temperature that the laser beam is stable

由于均匀热源加热半无穷大物体模型只反映了熔点以下的温度变化情况。对于熔融、液相存在的情况下的温度变化,本文的结论不一定成立。在熔融、液相存在的情况下,由激光功率涨落带来的温度变化需要进一步的研究。此外,模型中假设 k 和 K 不随温度而变化,和实际的情况也有出入。

总而言之,材料中的温度涨落不仅和入射激光不稳定的程度有关,还和材料的特性及激光加热的过程密切相关。这条结论建议我们为了在激光材料加工中的某些领域降低温度的涨落,针对不同的情况有三条途径可以采用:一是提高激光器的性能,降低入射激光的不稳定性;二是采用一定特性的材料,即热扩散率 k 小、热传导率 K 大的材料;三是采用大功率激光器,快速加热物体,缩短加热的时间。由于入射激光不稳定性对材料中温度场的分布的影响的定量研究还没有,我们的工作只能从最简单的均匀热源加热半无穷大物体模型出发。该模型对现象的描述是粗略的。这一方面的工作尚需更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] Xue-qin Wei, Li Cao, Da-jin Wu. Stochastic dynamics for systems driven by correlated colored noise. *Phys. Lett. (A)*, 1995, **207**(11) : 338~ 341
- [2] Hu Gang, H. Haken. Steepest-descent approximation of stationary probability distribution of systems driven by weak colored noise. *Phys. Rev. (A)*, 1990, **40**(12) : 7078~ 7081
- [3] Hu Gang. Two-dimensional probability distribution of systems driven by colored noise. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **43**(2) : 700~ 706
- [4] Peter Jung, Peter H nggi. Dynamical systems: A unified colored-noise approximation. *Phys. Rev. (A)*, 1987, **35**(10) : 4464~ 4466
- [5] Ya Jia, Jia-rong Li. Steady-state analysis of bistable system with additive and multiplicative noises. *Phys. Rev. (A)*, 1996, **53**(6) : 5786~ 5792
- [6] Zhu Shiqun. Saturation effects in a laser with multiplicative white noise. *Phys. Rev. (A)*, 1992, **45**(3) : 3210 ~ 3215
- [7] 魏学勤, 曹 力, 吴大进. 负关联噪声驱动单模激光的定态分析. *光学学报*, 1996, **16**(3) : 278~ 281
- [8] Wei Xue-qin, Cao Li, Wu Da-jin. Effects of correlated noises on statistic property of single-mode laser. *Chin. Phys. Lett.*, 1996, **13**(8) : 583~ 586
- [9] 王家金. 激光加工技术, 北京: 中国计量出版社, 1992. 253
- [10] 叶玉堂. 激光微细加工, 成都: 电子科技大学出版社, 1995
- [11] N. Bloembergen. Fundamentals of laser-solid interactions. *Laser-Solid Interactions and Laser Processing-1978*, AIP Conf. 50, edited by S. D. Ferris, H. J. Leany, J. M. Pocate, New York: American Institute of Physics, 1979. 6
- [12] Z. Lu, L. Moulton, V. Feigelson. Factors affecting the growth of single crystal fibers of the superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$. *J. Crystal Growth*, 1990, **106**(4) : 732~ 741
- [13] H. S. Caslaw, J. C. Jaeger. *Conduction of Heat in Solids*, New York: Clarendon Press, 1986 : 75~ 76
- [14] Dulay W. W.. *CO₂ Lasers Effects and Applications*, New York: Academic Press, 1976 : 139
- [15] Dulay W. W.. *CO₂ Lasers Effects and Applications*, New York: Academic Press, 1976 : 132~ 134

Effects of Laser Beam Fluctuation on Thermal Interaction Between Laser and Material

Wei Xueqin Zheng Qiguang Wang Honghai Li zaiguang
(The State Key Laboratory of Laser Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)
(Received 4 May 1998; revised 11 August 1998)

Abstract The effects of laser beam fluctuation on the temperature of material were studied for laser beam used as a thermal source. The noise source was firstly introduced into the differential equation of laser thermal conduction and the equation was solved. The temperature distribution was influenced by the noise. The fluctuation is strong at the surface of the material and weak in the deep of the material. The temperature distribution is related with laser thermal interaction process. With increasement of the laser heating time, the fluctuation increased. Moreover, The temperature distribution is also affected by the thermal conductivity K , thermal diffusivity k and absorptivity ϵ . Some suggestions are proposed for decreasing the influences of laser beam fluctuation.

Key words differential equation of laser thermal conduction, Guassian white noise, temperature fluctuation, thermal interaction between laser and material.