

文章编号 1004-924X(2011)02-0380-07

使用长脉冲高能激光对石英玻璃打孔

戴 罡, 陆 建, 刘 剑, 张 梁, 倪晓武
(南京理工大学 理学院 应用物理系, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了实现玻璃上的高效快速打孔, 研究了使用长脉冲激光在石英玻璃上打孔的方法。通过在玻璃表面镀制 ZrO_2 , 解决了石英玻璃对 1 064 nm 激光吸收弱的问题。使用脉宽为 1 ms、波长为 1 064 nm 的 Nd : YAG 激光在石英玻璃上打出了深为 1.55 mm 的锥形孔。研究了激光打孔的能效比, 结果显示, 当激光的能量密度为 6.8 kJ/cm^2 左右时, 打孔的效能比最大, 并分析了可能的原因。根据膜层及基底的吸收系数随温度增加而增加的特性, 分析了形成锥形深孔的机理。采用在玻璃的双面都增加吸收层的方法, 在玻璃上加工出柱状通孔。最后, 分析和讨论了吸收层的热学性质和光学性质对打孔的影响, 为提高打孔效率提供了设计方案。实验结果表明, 使用单脉冲 ms 激光能够高效地在玻璃上打出小深孔, 为提高玻璃打孔效率提供了新的思路。

关键词: 激光打孔; 高能激光; 长脉冲激光; 石英玻璃

中图分类号: TN249 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111902.0380

Experiment of long pulse high energy laser drilling on silica glass

DAI Gang, LU Jian, LIU Jian, ZHANG Liang, NI Xiao-wu

(*Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

Abstract: In order to improve the drilling efficiency of glass, a drilling hole method in the glass with a long pulse laser was investigated. ZrO_2 was deposited onto the glass to increase the absorption at 1 064 nm. A cone shaped hole with a depth of 1.55 m was obtained by using a Nd : YAG laser with a pulse duration of 1 ms. The efficiency of drilling holes were studied, which shows that the efficiency reaches the maximum value when the energy density equals 6.8 kJ/cm^2 . Then, the possible reasons were analyzed. The mechanisms of forming the cone shaped cavity were discussed by considering the property of absorption coefficient of glass that increases with the temperature. The cylindrical holes were obtained in the glass by adding absorption materials on both sides of the glass. Finally, the effects of thermal and optical properties of the absorption layer on the drilling holes were discussed to improve the drilling efficiency. The experiment results show that the single pulse ms laser can drill holes in glass by deposition absorption layers, which provides a new way for improving the drilling efficiency.

Key words: laser drilling, high energy laser; long pulse laser; silica glass

收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2010-10-30.

基金项目: 江苏省创新基金资助项目 (No. AD20286)

1 引言

随着玻璃工业的发展,玻璃成为很多领域重要的工程材料,例如建筑、医疗、汽车、平板显示以及电子工业等。玻璃属于高硬度、高熔点的脆性透明材料,无论对其进行机械研磨还是超声波加工,速度都不是很高,并且加工出的小孔的孔径较大,不适合加工直径 2 mm 以下的小孔^[1]。和传统的玻璃加工技术相比较,激光加工具备机动性强、速度快、无污染且不会破边等优点^[2]。一般而言,CO₂ 激光^[3-4]和准分子激光^[5-6]是加工玻璃的首选。这是由于玻璃对 1 064 nm 激光的吸收系数极小,Nd:YAG 激光仅用于特殊情况下的加工。近年来,飞秒激光在玻璃的加工中有重要的应用。Egashira 报道^[7]用了超声振动波法在玻璃上钻孔的研究,孔的直径和深度分别为 10 μm 和 20 μm。该方法适合微小孔径的加工,但小孔的深度较小。Thorsten^[8]等人使用准分子激光器在厚度为 200 μm 的玻璃上打出了顶部直径为 60 μm,中间直径为 20 μm 的孔。但准分子激光器的平均功率较低,打孔成本高。CO₂ 激光一般用于玻璃的切割。Shah^[9]等人使用飞秒激光在玻璃上加工出直径为 100 μm,长度超过 3 mm 的深孔(10 000 个脉冲),且打孔精度较好,但飞秒激光器的造价昂贵,打孔成本较高。脉宽为 ms 量级的激光在激光加工领域有广泛的应用,Boley^[10]等人研究了脉宽为 0.5 ms,单脉冲能量为 125 J,重复频率为 200 Hz 的激光在航空铝材上打孔的结果,并比较了有无吹气时的效果。Usov^[11]等人给出了脉宽 1~20 ms,单脉冲能量为 20~40 J,重复频率为 1~20 Hz 激光打孔,深熔焊和切割的最有参数。吴东江^[12]等人做了脉宽为 2 ms,重复频率为 35 Hz 激光弯曲硅片的实验研究。由于脉宽为 ms 量级激光与材料相互作用时不产生等离子体,激光能够直接照射到材料表面,且激光脉冲的时间又足够长,因而长脉冲激光打孔的效率比较高。使用长脉冲 YAG 激光在玻璃上打孔能够降低成本,提高打孔效率。目前,如何解决玻璃对 YAG 激光的吸收较弱的问题已成为关注的重点。

本文从增加吸收的角度出发,在玻璃表面增加吸收层,使用单个脉冲 YAG 激光就能在玻璃上打出深 1.55 mm 的孔。研究了激光打孔的能

效比,得出当激光的能量密度为 6.8 kJ/cm² 左右时,打孔的效率最高的结论,并分析了可能的原因。考虑到膜层及基底的吸收系数随温度的增加而增加的特性,给出可能形成锥形深孔的机理。最后,分析和讨论了吸收层的热性质和光学性质对打孔效果的影响。

2 实验准备

玻璃对 Nd:YAG 激光的吸收系数小于 0.01 m⁻¹,因此,该波长的激光不能直接用来加工玻璃,只有在玻璃的表面增加吸收层才能实现对玻璃的加工,因此吸收材料的选择是加工成败的关键因素。

2.1 材料的光学特性选择

吸收材料的光学性质决定了其对激光的吸收能力。介质对于光的吸收系数 α 由消光系数 κ 决定。

$$\alpha = \frac{2\kappa\omega}{c} = \frac{4\pi}{\lambda}\kappa, \quad (1)$$

其中 λ 为入射电磁波的波长。

材料的吸收和折射可以用复折射率 \tilde{n} 表示

$$\tilde{n} = n + i\kappa, \quad (2)$$

其中 n 为材料的折射率, κ 为材料的吸收系数。

根据 Maxwell 方程组可知,介质的复折射率 \tilde{n} 由其复相对介电常数 $\tilde{\epsilon}_r$ 决定

$$\tilde{n} = \tilde{\epsilon}_r^{1/2} \quad (3)$$

的关系,其中 $\tilde{\epsilon}_r = \epsilon_1 + i\epsilon_2$, ϵ_1 和 ϵ_2 分别为介质介电常数的实部和虚部。根据公式(2)和(3)可知

$$\begin{cases} \epsilon_1 = n^2 - \kappa^2 \\ \epsilon_2 = 2n\kappa \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} n = \frac{1}{\sqrt{2}}(\epsilon_1 + (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}} \\ \kappa = \frac{1}{\sqrt{2}}(-\epsilon_1 + (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}} \end{cases}. \quad (5)$$

由此可知,介质对于电磁波的吸收取决于该波长下介质的复介电常数;而其电导率由介质的电导率决定。为保证光的能量能够作用到玻璃上,要求被吸收层吸收的能量不超过 90%。根据 Beer 定律

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z}. \quad (6)$$

假定吸收介质的厚度为 10 μm,则吸收层的消光系数要小于 0.019 m⁻¹,且要大于玻璃的消

光系数。为了提高能量的利用率,吸收层的反射率要尽可能的小。当光正入射时,介质对于光的反射率为

$$R = \left| \frac{\tilde{n}-1}{\tilde{n}+1} \right|^2 = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2} \quad (7)$$

由图 1 可知,当 $10^{-5} < \kappa < 0.019$ 时,为了确保反射率在较低的水准(小于 20%),则介质的折射率要满足 $1 < n < 3.6$ 。正入射时,介质的反射率随折射率与消光系数的变化关系如图 1 所示。

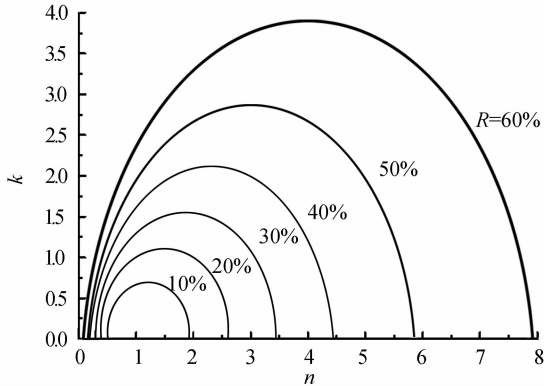


图 1 正入射时介质反射率随折射率与消光系数的变化关系

Fig. 1 Reflectivity determined by refractive index and extinction coefficient

2.2 材料的热性质

首先,若吸收介质的熔点低于玻璃的熔点,则吸收材料将先于玻璃被蒸发,吸收的能量被消耗在吸收材料的蒸发上,绝大部分都不能传递给玻璃。且形成的物质蒸汽将屏蔽激光的能量,不能使激光的能量直接作用在玻璃上,因此有必要选择熔点高于玻璃的熔点的材料。其次为了更好地将能量耦合至玻璃中,选择导热系数要相对较大的材料。综上所述,选取 ZrO_2 作为一种吸收层材料,以蒸镀的方式附着在玻璃之上。 ZrO_2 的熔点为 2 973 K,高于玻璃的熔点 1 873 K,导热系数和玻璃的相近。蒸镀的方式使得吸收材料与玻璃的结合较为紧密,更有利于热的传递。

在玻璃的表面镀制一层 $4 \mu\text{m}$ 厚的 ZrO_2 材料。实验装置如图 2 所示,将如处理过的石英玻璃固定在二维电位移平台之上,其中长脉冲激光器为 Beamtech Optronics 公司生产,型号为 Me-lar-50,输出波长为 1 064 nm,输出脉宽从 0.5~2.5 ms 可调,重复频率为 1 Hz,单脉冲激光输出能量为 0.5~50 J 可调,激光光束的发散角小于 3 mrad,光斑直径为 18 mm。激光束由透镜聚焦在

玻璃之上,通过调节透镜的位置来调节玻璃表面激光光斑的大小,聚焦透镜的焦距为 120 mm,其反射率为 7.8%,预处理过的玻璃被固定在二维电控位移平台上。

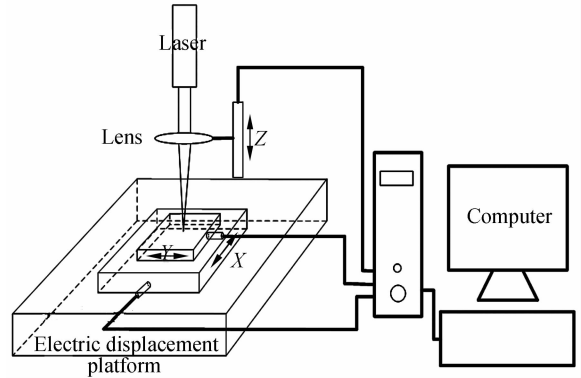


图 2 激光打孔装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser drilling system

3 实验结果

3.1 单面吸收层

图 3 为不同能量激光作用下玻璃的横截面图。聚焦在玻璃表面的激光光斑直径为 $400 \mu\text{m}$,经过换算,通过透镜到达玻璃表面的激光能量从 3.51 J 逐渐增加至 34.4 J,玻璃的厚度为 2 mm。图中的 7 个点均为单个脉冲激光一次性加工形成,孔的形状均为锥形。孔的深度与激光的能量之间的关系如表 1 所示。当激光的能量为 3.51 J 时,激光在玻璃上打出的孔如图 3 中的 a 所示,孔的直径和深度分别为 0.16 mm 和 0.31 mm,深宽比为 1.94 : 1。在激光能量小于 3.5 J 时形成的小孔并不明显,形成 b 孔的激光能量为 6.97 J,是 a 孔所需要的能量的 1.99 倍;b 孔的直径和深度分别为 0.25 mm 和 1.03 mm,b 孔的深宽比为 4.12 : 1。孔 c 的直径和深度分别为 0.30 mm 和 1.24 mm,孔的深宽比为 4.13 : 1;作用激光的能量为 11.1 J,是形成 b 孔的激光能量的 1.6 倍,c 孔的直径和深度均比 b 孔增加了 1.2 倍。d 孔所需的能量为 16.0 J,是 c 孔的 1.44 倍;孔径和深度分别为 1.38 mm 和 1.40 mm,分别是 c 孔的 1.27 倍和 1.13 倍。e, f 和 g 等 3 个孔的激光能量分别为 21.4 J, 27.8 J 和 34.4 J;形成的孔的直径和大小相仿,差异性要小于 3%,直径和深度分别是 d 孔的 1.05 倍和 1.08 倍。

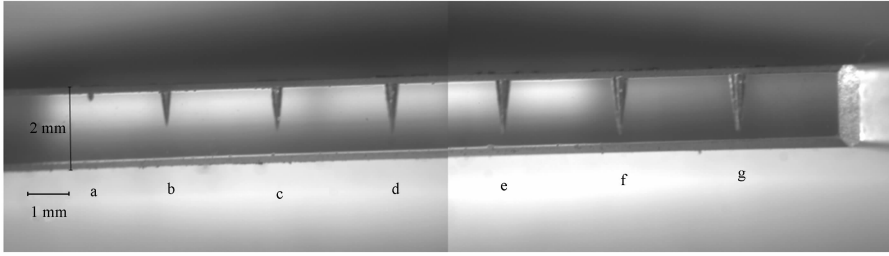


图 3 长脉冲激光打孔横截面(单面吸收层)

Fig. 3 Cross-section diagram of drilled holes by long pulse laser

表 1 不同能量密度下激光打孔的效能比

Tab. 1 Energy efficiency ratio of long pulse laser drilling

$\Phi=400 \mu\text{m}$	激光能量/J	孔的直径/mm	孔的深度/mm	能量密度/($\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$)	效能比/($\text{mm} \cdot \text{J}^{-1}$)
a	3.51	0.16	0.31	2.79	0.088
b	6.97	0.25	1.03	5.55	0.148
c	11.1	0.30	1.24	8.83	0.112
d	16.0	0.38	1.40	12.7	0.088
e	21.4	0.40	1.52	17.0	0.071
f	27.8	0.41	1.53	22.1	0.055
g	34.4	0.42	1.55	27.4	0.045

表 2 光斑直径与透镜距离之间的关系

Tab. 2 Optical spot diameter and laser determined distance away from the lens

距离/mm	光斑直径/ μm
220	463.6
230	440.2
240	403.9
250	400.1
260	404.5
270	437.9
280	460.8

3.2 在石英的双面增加吸收层

在玻璃的单面增加吸收层时,激光能够在玻璃上形成锥形孔。为了能够在玻璃上加工柱形的孔洞,在玻璃的双面都增加了厚度为 $4 \mu\text{m}$ 的 ZrO_2 。聚焦透镜的焦距同样为 250 mm ,激光的焦点聚焦在玻璃的中心处。激光聚焦后的光斑直径与透镜之间的关系如表 2 所示,可以看出在焦点附近 1 mm 处的光斑大小变化小于 1% ,这是由高斯光束的光斑的性质决定的。

将激光的光斑焦点聚焦在玻璃的中心处,单脉冲激光作用后的玻璃的横截面如图 4 所示。能量为 20 J 的单脉冲激光在玻璃上形成了一个柱

状通孔,通孔的最大直径为 $480 \mu\text{m}$,最小直径为 $420 \mu\text{m}$ 。由于热传导的作用,形成通孔的孔径要略大于激光的光斑直径。

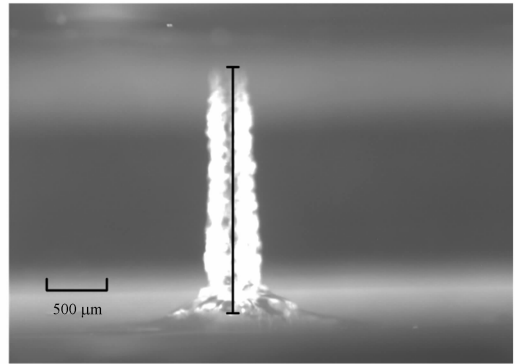


图 4 双面增加吸收层后长脉冲激光打孔好的横截面图

Fig. 4 Cross section of drilled hole treated with both sides

4 分析和讨论

打孔效果如图 2 所示。当单脉冲激光的能量密度在 2.79 kJ/cm^2 时,玻璃中开始形成小孔。随着激光能量密度的增加,孔的深度和口径也逐渐增加。当激光能量密度接近 17 kJ/cm^2 时,玻

璃中孔的大小几乎不发生变化。a 的效能比要小于 b 的效能比,在能量密度较低时,孔的深度随能量密度的增加而增加,这是由于激光能量密度的增加使得玻璃达到熔点的时间变短,玻璃能够吸收更多的能量,进而打孔效率增加。c 的效能比要小于 b 的效能比,在能量密度较高时,孔的深度随能量密度的增加其增幅减小,这是由于随着能量密度的增加,在玻璃表面物质蒸汽的浓度也增加,高浓度的物质蒸汽吸收了激光的能量,使得玻璃不能够直接吸收激光的能量,进而降低打孔效率。当激光能量密度在 6.8 kJ/cm^2 左右时,打孔的效能比最高。

材料对电磁波的吸收系数由方程(2)和(3)决定,而复折射率和复介电常数由方程(8)和(9)决定^[13-14],其中极化弛豫时间 τ 与温度 T 成反比,在入射电磁波频率 ω 不变时,吸收仅与温度有关。在室温时, τ 较小, $\omega\tau \ll 1$,基底材料(K9)的吸收系数随温度的增加而增加,当 $\omega\tau = 1$ 时,吸收系数 α 增加至最大值。

$$\epsilon_1 = \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) / (1 + \omega^2 \tau^2), \quad (8)$$

$$\epsilon_2 = (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \omega \tau / (1 + \omega^2 \tau^2). \quad (9)$$

在常温下, ZrO_2 对波长为 $1\ 064 \text{ nm}$ 的激光的吸收系数比玻璃大两个数量级,所以在激光作用的初始阶段玻璃对激光的吸收可以忽略不计。吸收区如图 5 中的区域 A 所示,A 区域在吸收大量的能量的同时,通过热传导将热量传递给周边的区域。最主要的热影响区如图 5 中的区域 B 所示,B 区域的玻璃在温度升高的同时,对激光的吸收系数逐渐增加。区域 A 的温度要稍高于区域 B 的温度,但温差要小于 5% 。当玻璃的吸收系数超过 ZrO_2 的吸收系数时,热量将由区域 B 传递至周边区域。与此同时,随着玻璃温度的增加其折射率也逐渐增加,进而将本应发散的高斯光束进一步聚焦。在热传导和自聚焦的共同作用下,热影响区逐渐增加至区域 C。由于 ZrO_2 的熔点为 $2\ 973 \text{ K}$,要远高于玻璃的熔点 $1\ 873 \text{ K}$,当玻璃熔融时, ZrO_2 对激光仍处于弱吸收状态,且其力学性质并未发生剧烈变化。 ZrO_2 的角色发生了变化,由原先的吸收层变为束缚层。熔融的玻璃继续吸收激光的能量,而此时,玻璃中大量的能量不能及时通过热传导传递出去而大量积累。由于玻璃并不与空气自由接触,其表面束缚了一层 ZrO_2 ,使得玻璃中的压力得不到释放。随着能

量进一步的积累,过热的玻璃冲破 ZrO_2 的束缚全部释放出来,从而在玻璃中形成锥形的孔。

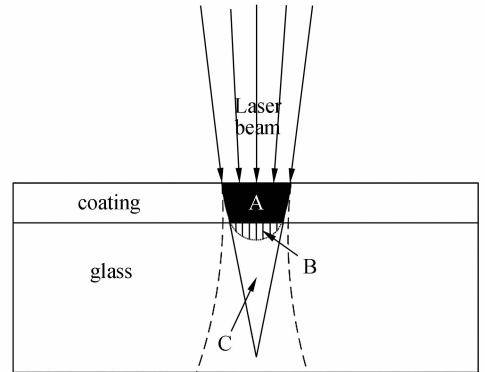


Fig. 5 Laser irradiation of glass with coating

图 5 激光照射下石英玻璃热影响区的发展示意图

吸收材料的吸收系数和熔点是影响打孔效果的最主要的因素。首先,吸收层的吸收深度(D)要大于吸收层的厚度(h)。当 $D > 10h$ 时,吸收层可认为是体吸收。和吸收材料相连的玻璃的温度和吸收材料才能比较接近。这就意味着吸收层的吸收系数尽量能够保持相对较小,不影响玻璃对激光的吸收,其次,吸收层的熔点要远大于玻璃的熔点。如果吸收层先于玻璃到达熔点,势必将阻碍玻璃对激光的吸收,且失去了其束缚的效果,进而可能降低打孔的深度。

5 结 论

本文为了解决在玻璃上高效快速打孔的问题,提出在玻璃表面增加吸收层的方法,对使用长脉冲激光在玻璃上打孔进行了实验研究和理论分析。通过在膜层表面增加吸收层,使用单脉冲 ms 激光在玻璃上打出锥形孔,最大孔深达 1.55 mm ,且当激光能量密度在 6.8 kJ/cm^2 左右时,打孔效率最高。研究指出:当能量密度超过 6.8 kJ/cm^2 时,在玻璃表面形成的物质蒸汽降低了打孔效率。玻璃对激光的吸收系数随着温度的增加而增加,在热传导的作用下玻璃的温度逐渐上升,温度的增加使得玻璃吸收更多的能量,熔融的玻璃喷溅而出,进而在玻璃上形成锥形孔。选取合适的吸收材料是打孔成败的关键,使用单脉冲 ms 激光能够高效地在玻璃上打出小深孔,为提高玻璃打孔效率提供了新的思路。本文的研究结果将

对长脉冲激光在玻璃上打孔的深入研究提供实验

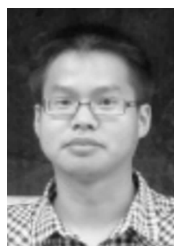
参考和理论分析。

参考文献:

- [1] 吴东江,牛方勇,刘双,等. CO₂ 连续激光弯曲硼硅酸盐玻璃薄片的实验研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(8):1416-1422.
- WU D J, NIU F Y, LIU SH, *et al.*. Borosilicate glass film bending by CO₂ CW-laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8):1416-1422. (in Chinese)
- [2] NIKUMB S, CHEN Q, LI C, *et al.*. Precision glass machining drilling and profile cutting by short pulse lasers [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 477(1-2):216-221.
- [3] JIAO J, WANG X B. A numerical simulation of machining glass by dual CO₂ laser beams [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(2):297-301.
- [4] DUBEY A, YADAVA V. Laser beam machining a review [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(6):609-628.
- [5] SALMAN N, SHEIKH M A, LI L, *et al.*. Effect of thermal stresses on chip-free diode laser cutting of glass [J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(3):318-327.
- [6] 魏仁选,姜德生,周祖德. 准分子激光脉冲直写刻蚀速率与能量密度的关系[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2):231-234.
- WEI R X, JIANG D SH, ZHOU Z D. Relationship between average etching velocity and laser pulse energy density during excimer laser direct etching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2):231-234. (in Chinese)
- [7] EGASHIRA K, MIZUTANI K. Ultrasonic vibration drilling of micro holes in glass [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2002, 50(1):

- 339-342.
- [8] THORSTEN T, ANDREAS O, CHRISTIAN K, *et al.*. Precision drilling of fused silica with 157 nm excimer laser radiation [J]. *SPIE*, 2003, 4977(40):555-562.
- [9] LAWRENCE S, JESSE T, MARTIN R, *et al.*. Femtosecond laser deep hole drilling of silicate glasses in air [J]. *Applied Surface Science*, 2001, 183(3-4):151-164.
- [10] BOLEY C D, CUTTER K P, FOCHS S N, *et al.*. Interaction of a high power laser beam with metal sheets [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(4):043106-043106. 5.
- [11] USOV S V, MINAEV I V. High power impulse YAG laser system for cutting welding and perforating of super hard materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1-3):541-545.
- [12] 吴东江,马广义,周秋菊,等. 长脉宽脉冲激光硅片弯曲成形试验[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9):1361-1365.
- WU D J, MA G Y, ZHOU Q J, *et al.*. Experimental study of bending silicon chip with long pulse width laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9):1361-1365. (in Chinese)
- [13] TINTEN K S, von der LINDE. Generation of dense electron hole plasmas in silicon [J]. *Phys Rev B*, 2000, 61(4):2643-2650.
- [14] TINTEN K S, BIALKOWSKI J, LINDE D V. Ultra fast laser-induced order disorder transitions in semiconductors [J]. *Phys Rev B*, 1995, 51(20):14186-14198.

作者简介:



戴 罡(1984—),男,江苏扬中人,博士研究生,2005年于南京理工大学获理学学士学位,主要从事激光与光学薄膜相互作用的研究。E-mail: huma_1@163.com

陆 建(1965—),男,江苏扬州人,博士,教授,博士生导师,主要从事高功率激光与材料相互作用机理、激光与生物组织相互作用、强场物理等方面的研究。E-mail: lujian@mail.njust.edu.cn

刘 剑(1983—)男,山东济宁人,博士研究生,主要从事激光与脆性材料相互作用的研究。E-mail: liujiannjlg@yahoo.com.cn

张 梁(1980—),男,吉林长春人,博士研究生,2007年于南京理工大学获得硕士学位,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: abcd3614@yahoo.com.cn

倪晓武(1955—),男,江苏镇江人,教授,博士生导师.1988年于华东工学院应用物理系获博士学位,目前主要从事激光与物质相互作用机理和测试方法的理论和实验研究。E-mail: jsnjnxw@gmail.com

● 下期预告

单帘正交组合式焦平面快门的设计与性能测试

张洪文^{1,2},冷 雪²,张继超²,丁亚林²,曹国华¹

(1. 长春理工大学,吉林 长春 130025;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

提出一种焦面帘幕式快门的设计与实现,用于焦面空间尺寸小,两 CCD 成像面由于棱镜拼接而成正交垂直分布的某型航空相机。快门采用齿形带作为快门帘幕,齿形带上开合适宽度的长条形孔作为曝光帘缝,通过改变帘缝运动速度调整曝光时间。采用两个快门帘幕正交布置,同步驱动的方法,实现两片面阵 CCD 同时曝光。通过编码器反馈,控制快门驱动电机转速,使 CCD 曝光时快门帘保持稳速,从而保证 CCD 曝光均匀性。通过实测,快门曝光时间可实现 $1/300\text{ s} \sim 1/1\,000\text{ s}$ 连续可调,CCD 曝光均匀性优于 10%。通过更换快门帘,改变曝光帘缝宽度,可进一步拓宽曝光时间调节范围。实验结果表明,此种快门能够满足面阵 CCD 航空相机的成像要求。