

纳秒激光加工石英微通道的实验与理论研究

李世雄 白忠臣 秦水介

(贵州大学贵州省光电子技术及应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要 利用调 Q Nd:YAG 激光器输出的 1064 nm 纳秒脉冲激光聚焦在石英上, 分别采用激光热加工法和激光诱导等离子体法加工微通道。热加工的通道长度可控, 通道周围产生热裂纹; 诱导等离子体加工的微通道内壁光滑, 通道深度可达 4 mm。研究了激光热加工微通道时的温度场和热应力分布, 分析了激光诱导等离子体加工微通道的过程。研究表明, 激光热加工时温度场的存在导致热应力的产生, 热应力超过石英断裂阈值使石英发生炸裂, 导致微通道的形成及热裂纹的产生; 激光诱导等离子体法由于等离子体屏蔽效应产生的高温等离子体烧蚀石英形成微通道, 避免了热裂纹的产生。

关键词 激光技术; 微通道; 热应力; 热裂纹

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.041401

Research on the Fabrication of Micro Channels in Fused Silica Substrates by Nanosecond Laser

Li Shixiong Bai Zhongchen Qin Shuijie

(Guizhou Provincial Key Laboratory of Photoelectron Technology and Application, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract A Q-switched Nd:YAG laser is used to fabricate micro channels in a fused silica substrate by thermal induced processing and laser-induced plasma processing. The length of micro channels by thermal induced processing can be controlled and there are many thermal cracks around the channel. The interior wall of the micro channels drilled by laser-induced plasma is smooth, and the depth of the channel is up to 4 mm. The temperature and thermal stress distributions of thermal induced processing are calculated, and the behavior of laser-induced plasma processing is studied. The results indicate that as a result of great temperature changes, the thermal stress is larger than the fracture strength of sample, which leads to the formation of the channel and the thermal cracks. The ablation of the high temperature plasma formed by plasma shielding effects leads to a micro channel of high quality with a smooth internal surface and no thermal cracks.

Key words laser technique; micro channel; thermal stress; thermal crack

OCIS codes 140.3330; 140.3390; 140.3440; 140.6810; 350.5400

1 引言

微通道是微机电系统(MEMS)中的重要微结构之一。通道质量的好坏影响其在微机电系统中的应用价值, 因此微通道制作技术成为关键的因素。传统的微通道制作方法复杂、昂贵, 随着高功率激光的诞生, 用激光在透明光学材料中加工微通道得以实现。激光加工微通道有激光热加工法和激光诱导等离子体加工法。石英具有透光性好、化学性质稳定等优点, 是一种很好的微通道材料。激光在石英上加工微通道已有研究^[1~3], 其中激光热加工法加工速度快、通道长度可以控制, 但是热裂纹多、内壁粗糙、通道不直; 激光诱导等离子体加工的石英微通道内壁光滑、无热裂纹, 但通道深度只能达到 4 mm。研究激光加工石英微通道的损

收稿日期: 2011-10-14; 收到修改稿日期: 2011-11-07; 网络出版日期: 2012-02-15

基金项目: 贵州省社会发展攻关项目(黔科合 SY[2010]3037 号)和贵州大学研究生创新基金(校研理工 2011004)资助课题。

作者简介: 李世雄(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光微加工方面的研究。E-mail: lishixiong1985@126.com

导师简介: 秦水介(1963—), 女, 教授, 主要从事激光应用与微电子机械系统等方面的研究。

E-mail: shuijie.qin@gmail.com

伤机理,改善微通道的加工质量,有利于加工更有应用价值的微通道。

激光与材料相互作用时,材料吸收激光能量导致温度升高、熔融、气化、等离子体形成等效应,使材料出现变形、气泡、裂纹、通道等损伤形态^[4~6]。而这些都起因于激光对材料的加热效应,激光辐照光学材料引起的热应力效应受到关注,并有多方面的研究^[7,8]。如何有效控制热应力的产生是激光加工中的难点。

对于 1064 nm 的红外激光,在较弱的光强下,石英几乎完全透射,吸收系数较弱(约 0.01 cm^{-1}),但在高功率密度激光辐照下,由于缺陷以及非线性吸收效应等,吸收系数增大,石英将迅速吸收光能而升温。温度场的存在将引起热应力的产生,产生的热应力超过石英的极限应力时,会产生裂纹甚至炸裂。本文利用调 Q Nd:YAG 激光器输出的 1064 nm 纳秒脉冲加工石英微通道,对微通道的形成与特点进行了分析。

2 实验

2.1 实验装置

实验装置主要包含激光加工系统和观测测量系统两部分。采用如图 1 所示的激光加工系统,其中激光器是声光调 Q 的 Nd:YAG 激光器,实验中输出波长为 1064 nm 的基频光,激光重复频率(可调)设置为 2000 Hz,脉宽(可调)设置为 140 ns,激光脉冲是基模高斯脉冲,脉冲能量约 1.7 mJ。该实验在空气环境下进行,激光器由计算机控制。激光束经过准直扫描后,再经一焦距为 100 mm 的聚焦透镜(焦点处光斑尺寸约为 $400 \mu\text{m}^2$,即 $1/e^2$ 强度处半径约为 $12 \mu\text{m}$)会聚入射到石英样品表面进行加工,熔融石英样品是上海石创光学玻璃仪器有限公司生产的六面抛光的熔融石英立方体。用于观测测量的是 BM-13 荧光显微镜。

2.2 实验结果

利用激光热加工和诱导等离子体加工方法加工石英微通道。激光热加工将激光聚焦于石英底面,由于背面比正面更容易损伤^[1,9],在焦点区域形成损伤,由下往上移动焦点,将形成一条微通道。图 2 即为热加工出的微通道显微图,由图可知,通道周围有许多热裂纹。为了消除热加工产生的热裂纹,采用另一种加工方法,首先按热加工法在背面加工一损伤点,然后将激光正面聚焦于该损伤点,诱导石英产生等离子体,等离子体吸收激光能量,将烧蚀周围的石英继续形成等离子体,移动焦点,等离子体将烧蚀出微通道。如图 3 所示,微通道内壁光滑,通道周围没有产生热裂纹。

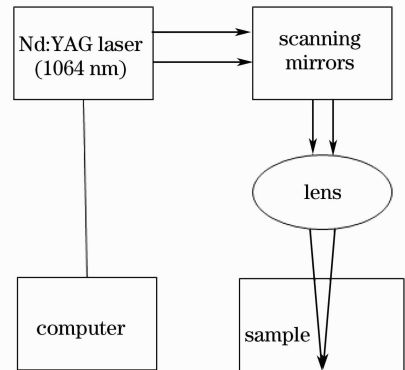


图 1 激光加工系统

Fig. 1 Experimental setup for fabricating micro channels

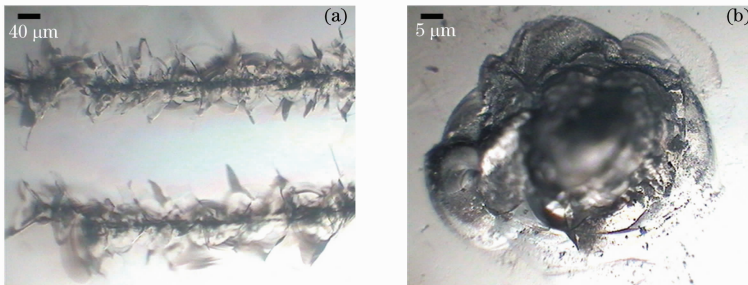


图 2 激光热加工的微通道

Fig. 2 Microscope photos of micro channels drilled by thermal induced processing

3 理论分析

3.1 激光脉冲的功率密度分布

高斯激光脉冲的功率形式为^[10,11]

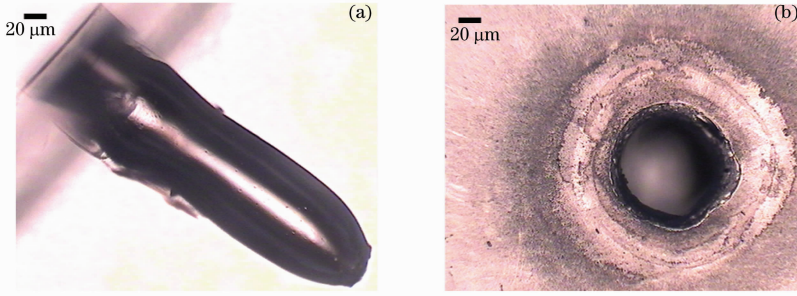


图3 激光诱导等离子体加工的微通道

Fig. 3 Microscope photos of micro channels drilled by laser-induced plasma processing

$$P(t) = P_{\max} \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{t}{\tau_p}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中 τ_p 为脉冲宽度(半峰全宽, FWHM), 设 T_h 为脉冲半宽度(半峰半宽, HWHM), 则 $\tau_p = 1.665 T_h$; P_{\max} 为脉冲的峰值功率, 与脉冲能量的关系为 $E_p = 1.064 P_{\max} \tau_p$ 。

空间高斯光束在横截面的场分布满足高斯分布, 随着到光束中心距离的增加, 光强减小很快, 高斯光束不同位置横截面的功率密度为^[11]

$$I(r, z) = \frac{2P}{\pi w^2(z)} \exp\left[-\frac{2r^2}{w^2(z)}\right], \quad (2)$$

式中 P 为高斯光束的功率, $w(z)$ 为光束半径, $w(z) = w_0(1 + z^2/z_R^2)^{1/2}$, $z_R = n\pi w_0^2/\lambda$ 为瑞利长度, n 为介质折射率, λ 为激光波长, w_0 为聚焦半径。

对于纳秒脉冲, 由(1), (2)式得出激光在不同时刻不同位置的功率密度分布为

$$I(r, z, t) = \frac{2P_{\max} \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{t}{\tau_p}\right)^2\right]}{\pi w^2(z)} \exp\left[-\frac{2r^2}{w^2(z)}\right]. \quad (3)$$

在焦点附近, $w(z)$ 随 z 的变化不是很大, 可以认为 $I(r, z, t) = I(r, 0, t)$, 则

$$I(r, t) = \frac{2P_{\max} \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{t}{\tau_p}\right)^2\right]}{\pi w_0^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{w_0^2}\right). \quad (4)$$

3.2 激光照射时材料温度

激光辐照材料, 材料吸收激光能量, 光强减弱, 由光的吸收定律得激光通过 dl 厚的材料后光强减少量为

$$dI = I_0 \beta dl, \quad (5)$$

式中 β 为材料的吸收系数, I_0 为入射到材料表面的激光强度。激光聚焦于石英样品, 纳秒激光脉冲作用, 热传导可以忽略, 材料吸收的激光能量全部转换为该点的温升, 聚焦处取一微元体(面积 ds , 高 dl), 由能量平衡有^[12]

$$\rho C ds dl dT = dI ds dt, \quad (6)$$

式中 ρ 为石英密度, C 为比热, 根据激光功率密度分布(4)式, 再由(5), (6)式得到

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \beta I(r, t). \quad (7)$$

激光照射前的初始温度为 T_0 , 根据高斯脉冲特点, 初始时刻应取 $-\tau_p$, 即 $T(-\tau_p) = T_0$, $-\tau_p < t < \tau_p$, 由(7)式解得

$$T(r, t) = \frac{\beta P_{\max} \tau_p \exp\left(-\frac{2r^2}{w_0^2}\right)}{2\sqrt{\pi} w_0^2 \rho C \sqrt{\ln 2}} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{2t}{\tau_p} \sqrt{\ln 2}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-2\tau_p}{\tau_p} \sqrt{\ln 2}\right) \right] + T_0, \quad (8)$$

式中 $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy$ 。(8)式表示了激光辐照下焦点区域一个脉冲作用时间内的温度分布。

3.3 激光加工微通道的热应力

由热力学理论可知,固体材料由于温度场的存在必然导致热应力的产生。由于激光束是高斯型,具有中心对称性,对于各向同性体,由轴对称热应力理论可知应力、应变、温度变化之间的关系式为^[8,13]

$$\sigma_r = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [(1-\nu)\epsilon_r + \nu(\epsilon_\theta + \epsilon_z)] - \frac{E\alpha\Delta T}{1-2\nu}, \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [(1-\nu)\epsilon_\theta + \nu(\epsilon_z + \epsilon_r)] - \frac{E\alpha\Delta T}{1-2\nu}, \quad (10)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [(1-\nu)\epsilon_z + \nu(\epsilon_r + \epsilon_\theta)] - \frac{E\alpha\Delta T}{1-2\nu}, \quad (11)$$

式中 E, ν, α 分别为材料的杨氏弹性模量、泊松比、线膨胀系数, σ_r 为沿半径方向的正热应力, σ_θ 为沿圆周方向的环向正热应力, σ_z 为沿 z 方向的正热应力, $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z$ 分别为对应方向的应变。

激光聚焦处焦斑尺寸远小于石英样品,属于无限边界情形,高斯光束引起的温度场关于中心轴对称,焦点处不随轴坐标 z 变化,则热应力表达式为^[8,13]

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \left(- \int_0^r \Delta T r dr \right), \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \left(\int_0^r \Delta T r dr - \Delta T r^2 \right), \quad (13)$$

$$\sigma_z = - \frac{\alpha E}{1-\nu} \Delta T. \quad (14)$$

在以上激光辐照材料时由于温度变化导致的热应力表达式中,环向正热应力 σ_θ 最有意义,分析认为正是由于 σ_θ 超过了材料断裂的极限应力,使石英炸裂,形成通道以及热裂纹,而 σ_r, σ_z 对此过程起辅助作用。利用(8),(13)式可得出环向正热应力:

$$\sigma_\theta(r, t) = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{\beta P_{\max} \tau_p}{2\sqrt{\pi} \omega_0^2 \rho C \sqrt{\ln 2}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{2t \sqrt{\ln 2}}{\tau_p} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{-2\tau_p \sqrt{\ln 2}}{\tau_p} \right) \right] \left\{ \frac{\omega_0^2}{4r^2} \left[1 - \exp \left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2} \right) \right] - \exp \left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2} \right) \right\}. \quad (15)$$

3.4 数值计算与分析

在激光强度不强的情况下,石英对红外光吸收系数很小;当高功率激光聚焦后,达到很高的功率密度,由于缺陷及非线性吸收效应等,造成激光的强烈吸收,吸收系数发生巨大变化^[4,12]。取吸收系数 $\beta = 10 \text{ cm}^{-1}$ (实际吸收系数可能更大),石英材料参数为:密度 $\rho = 2.25 \text{ kg/m}^3$,比热 $C = 1087 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,杨氏模量 $E = 8.5 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$,泊松比 $\nu = 0.17$,膨胀系数 $\alpha = 5.4 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$,初始温度为室温 $T_0 = 300 \text{ K}$ 。

图4(a)是聚焦区域 $r = 1 \mu\text{m}$ 处温度随脉冲作用时间的变化。由图可知,温度增加速率在前半个脉冲时

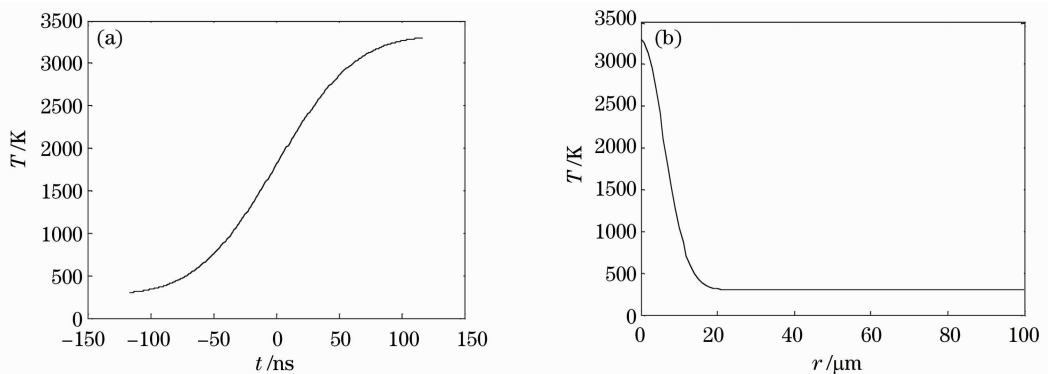


图4 (a)聚焦区域 $r = 1 \mu\text{m}$ 处温度随脉冲作用时间的变化; (b)脉冲结束时聚焦区域的温度分布

Fig. 4 (a) Temperature profile as a function of time at a given radial distance of $1 \mu\text{m}$; (b) temperature profile as a function of radial distance at the end of the pulse

间内比后半脉冲时间快。在极短的时间内,温度从几百开尔文增加到几千开尔文,温度梯度大。图 4(b) 是一个脉冲结束时聚焦区域的温度分布。由图可知,中心温度最高,随着聚焦区域半径的增加,温度迅速降低,脉冲作用时间短,由于没有考虑热传导,半径增加到激光辐照区域以外时,温度减为常温。图 4 表明,在时间和空间上都存在很大的温度梯度,温度梯度的存在将导致热应力的产生。

图 5(a)是聚焦区域 $r=1\ \mu\text{m}$ 处环向热应力随脉冲作用时间的变化,负值代表受到压应力。由于应力变化主要取决于温度梯度,应力随脉冲作用时间的变化趋势与温度变化趋势相似。图 5(b)是一个脉冲结束时聚焦区域的环向热应力分布,负值表示压应力,正值表示拉应力。 $r<15\ \mu\text{m}$ 时热应力为压应力,且热应力随着聚焦区域半径的增加而减小得很快; $r>15\ \mu\text{m}$ 时热应力为拉应力,随着半径的增加,热应力逐渐减小,最大热应力达到 80 MPa。此时热应力已经大大超过了石英的破裂极限应力,在极短的时间内形成很大的热应力使聚焦处发生炸裂,炸裂后的石英更易吸收后续激光能量,进而熔融、气化石英,并有短暂的等离子体产生。形成的等离子体向外喷出,不能吸收激光能量膨胀扩大,在极短的时间内焦点处会因炸裂、熔融、气化等作用损伤石英,形成微通道。随着半径的增加,热应力逐渐减小,但仍超过石英的破裂极限应力,导致通道周围形成热裂纹。移动焦点,激光通过后,温度迅速降低,形成很大的热应力,在加热过程中形成的裂纹会进一步扩大。从石英底面向上移动焦点,加工出一条微通道,由于热应力的存在,形成的微通道裂纹多而且不直。远离通道的地方也存在热应力,但不能造成石英断裂破坏,而是使石英发生形变等;激光通过后仍有残余应力存在。将热加工的微通道分为 3 个区,即通道区、热裂纹区和形变区。激光辐照产生了不同大小的热应力,导致这 3 种损伤形貌。

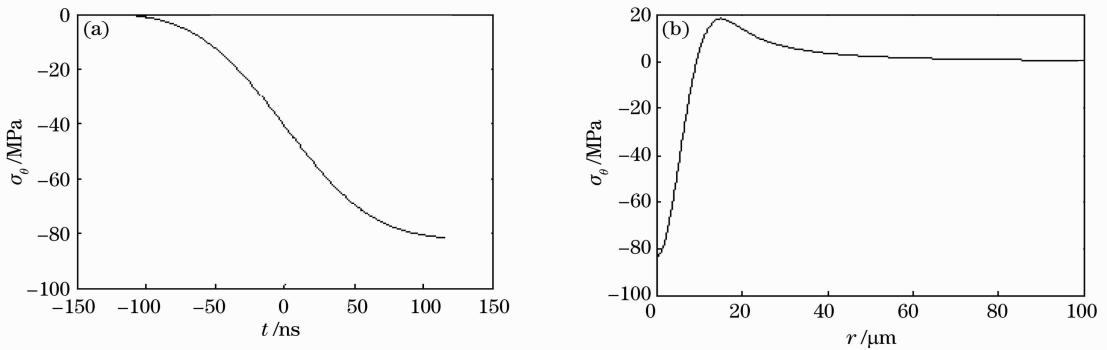


图 5 (a)聚焦区域 $r=1\ \mu\text{m}$ 处环向热应力随脉冲作用时间的变化;(b)脉冲结束时聚焦区域的环向热应力分布
Fig. 5 (a) Hoop stress as a function of time at a given radial distance of $1\ \mu\text{m}$; (b) hoop stress as a function of radial distance at the end of the pulse

3.5 等离子体加工微通道

按激光热加工法在背面加工一损伤点,然后将激光正面聚焦于该损伤点,由于缺陷以及激光在该损伤点的来回反射,激光的吸收率将急剧增加,激光首先将在损伤点熔融、气化石英,石英蒸气向外喷出。由于迎着激光方向,石英蒸气将吸收激光能量发生电离,当激光强度足够大时,发生很强的电离,形成高温高密度等离子体。等离子体吸收后续激光能量,阻断激光直接照射石英,即所谓的等离子体屏蔽效应,如图 6 所示。高温高密度的等离子体将烧蚀石英,并吸收后续激光能量,进一步形成等离子体,向外膨胀,形成激光支持的吸收波^[4,14],对材料产生巨大的冲击作用,有助于等离子体烧蚀石英。移动焦点,激光诱导的等离子体将烧蚀出一条高质量的微通道。等离子体通过后,通道内壁熔化的石英再固化,形成的微通道内壁光滑,没有产生热裂纹。

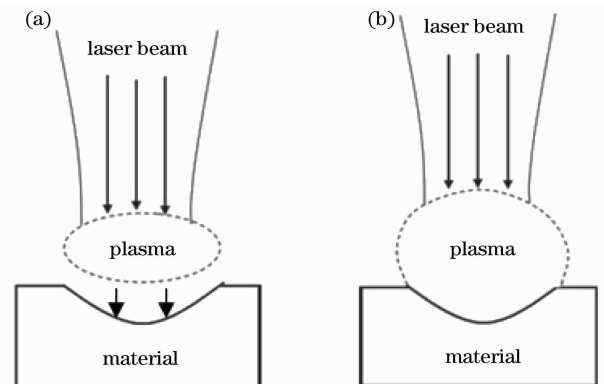


图 6 激光诱导等离子体烧蚀石英微通道。(a)等离子体形成;(b)等离子体屏蔽效应
Fig. 6 Fabrication of micro channels by laser-induced plasma
(a) Plasma forming; (b) plasma shielding effects

激光热加工微通道时,激光直接与石英作用,产生的热应力导致裂纹的产生。而激光诱导等离子体加工微通道时,激光首先与石英直接作用,使石英熔融气化。蒸气吸收激光能量通过非线性吸收发生电离,形成高温高密度等离子体并烧蚀石英微通道,等离子体形成后,激光不与石英直接作用,而是由激光、石英等离子体、石英相互作用,等离子体的烧蚀避免了通道周围热裂纹的产生,提高了微通道的质量。

4 结 论

通过激光热加工法和激光诱导等离子体法加工石英微通道,热加工法加工出来的微通道长度可以控制,通道周围产生热裂纹,而激光诱导等离子体加工出的微通道内壁光滑,通道深度可达 4 mm。计算得到了激光热加工微通道的温度场和热应力分布,巨大的温度梯度导致了热应力的产生,热应力超过石英发生断裂的极限应力,聚焦处发生炸裂,炸裂后的石英更易吸收后续激光能量。激光直接辐照热加工,极短的时间内石英吸收激光能量产生极大热应力发生炸裂,导致微通道形成和热裂纹的产生。激光诱导等离子体加工微通道由于等离子体屏蔽效应使激光没有直接作用于石英,而是靠高温等离子体烧蚀石英形成微通道,等离子体通过后,内壁熔化的石英固化,消除了热裂纹的产生。

参 考 文 献

- 1 S. J. Qin, W. J. Li. Micromachining of complex channel systems in 3D quartz substrates using Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Appl. Phys. A*, 2002, **74**(6): 773~777
- 2 Fan Yongfa, Qin Shuijie. Optical analysis of the plasma induced by the laser micromachining[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(6): 64~67
樊永发. 秦水介. 激光加工过程中激光诱导等离子体的光学研究[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(6): 64~67
- 3 Feng Cailing, Wang Haixu, Qin Shuijie. Research of the fabrication of micro channels in a fused silica substrate using laser-induced plasma[J]. *Laser Technology*, 2010, **34**(4): 433~435
冯彩玲, 王海旭, 秦水介. 激光诱导等离子体加工石英微通道的研究[J]. 激光技术, 2010, **34**(4): 433~435
- 4 Narendra B. Dahotre, Sandip P. Harimkar. Laser Fabrication and Machining of Materials[M]. New York: Springer, 2008. 34~137
- 5 Gan Rongbing, Lin Libin, Lu Yong *et al.*. Laser-induced bulk damage of UBK7 glass owing to its rear-surface defects[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(5): 603~606
甘荣兵, 林理彬, 卢勇等. UBK7玻璃后表面缺陷诱导体内激光损伤[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(5): 603~606
- 6 Dou Hongqiang, Chen Zhenxing, Xu Shizhen. Effects of 10.6 μm laser irradiation on a quartz crystal[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(6): 061401
窦红强, 陈贞兴, 徐世珍. 10.6 μm 激光对石英晶体的辐照效应[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(6): 061401
- 7 Luo Fu, Sun Chengwei, Du Xiangwan. Stress relaxation damage in K9 glass plate irradiated by 1.06 μm CW laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(1): 19~22
罗福, 孙承纬, 杜祥琬. 1.06 μm 连续激光照射K9玻璃板的应力松弛破坏[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(1): 19~22
- 8 Un-Chul Paek, Francis P. Gagliano. Thermal analysis of laser drilling processes[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1972, **QE-8**(2): 112~119
- 9 Hua Jinrong, Zu Xiaotao, Li Li *et al.*. Numerical simulation of laser-induced damage on rear surface of optical material[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(6): 919~922
花金荣, 祖小涛, 李莉等. 激光诱导光学材料后表面损伤的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(6): 919~922
- 10 C. H. Fan, J. P. Longtin. Modeling optical breakdown in dielectrics during ultrafast laser processing[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(18): 3124~3131
- 11 A. E. Siegman. Lasers [M]. Sausalito: University Science Books, 1986
- 12 A. M. Rubenchik, M. D. Feit. Initiation growth and mitigation of UV laser induced damage in fused silica[C]. *SPIE*, 2001, **4679**: 79~95
- 13 Li Weite, Huang Baohai, Bi Zhongbo. The Theoretical Analysis and Application of Thermal Stress[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004
李维特, 黄保海, 毕仲波. 热应力理论分析与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004
- 14 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. Physics of the Interaction for Laser and Materials[M]. Beijing: China Machine Press, 1996
陆建, 倪晓武, 贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996