

文章编号: 1001-3806(2018)03-0351-06

## 钡化合物辅助激光刻蚀石英玻璃的实验研究

丛启东,袁根福\*,章辰,郭百澄  
(江南大学机械工程学院,无锡 214122)

**摘要:** 为了提高石英玻璃对普通脉冲红外激光的吸收效率,用钡化合物粉体覆盖层辅助 1064nm 红外激光刻蚀石英玻璃,采用能谱仪和 X 射线衍射分别对 BaCrO<sub>4</sub>, BaCl<sub>2</sub> 和 Ba(OH)<sub>2</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃得到的刻槽底面刻蚀产物进行了测试和分析,对 3 种刻蚀方法的刻蚀机理进行了理论分析和实验验证。结果表明, BaCrO<sub>4</sub> 和 Ba(OH)<sub>2</sub> 粉体的刻蚀机理都存在化学反应去蚀石英玻璃的作用,二者去蚀率都较高; BaCl<sub>2</sub> 粉体的刻蚀过程中无化学反应起到去蚀作用,去蚀率低下。这一结果对激光加工石英玻璃的工业应用提供技术基础。

**关键词:** 激光技术;激光刻蚀;钡化合物;粉体覆盖层;石英玻璃

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.03.012

## Experimental study about laser etching fused silica based on barium compounds

CONG Qidong, YUAN Genfu, ZHANG Chen, GUO Baicheng

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** In order to improve the absorption efficiency of ordinary pulsed infrared laser for fused silica, a new method for 1064nm infrared laser etching fused silica assisted by barium compound powder coating was proposed. The etching products adhering to the surface of the groove etched by laser assisted by BaCrO<sub>4</sub>, BaCl<sub>2</sub>, and Ba(OH)<sub>2</sub> powder coating were tested and analyzed by means of energy dispersive spectrometer (EDS) and X-ray diffraction (XRD) respectively. The results show that the etching mechanisms of BaCrO<sub>4</sub> and Ba(OH)<sub>2</sub> powder have the chemical reaction to remove quartz glass and the corrosion rates are high. The etching mechanism of BaCl<sub>2</sub> powder has no chemical reaction to remove quartz glass and the corrosion rate is low. The study provides the technical basis for the industrial application of laser processing fused silica.

**Key words:** laser technique; laser etching; barium compound; powder coating; fused silica

### 引言

石英玻璃具有结构均匀、透光性好、可透射的光谱频带宽、热膨胀系数小、抗热震性好、化学性质稳定和抗激光损伤能力强等优点,被广泛应用于半导体光刻设备、大功率激光器和太空望远镜等透射和反射型光学系统<sup>[1-3]</sup>。但由于石英玻璃属于典型的硬脆材料,加工过程容易出现微裂纹甚至崩边现象,故加工难度较大<sup>[4]</sup>。石英玻璃的加工工艺有很多种,其中刻蚀工艺被应用到很多方面,如玻璃打标<sup>[5]</sup>、制作光栅<sup>[6]</sup>等等。激光特有的光作用、热作用和等离子体效应使其在加工技术中占有重要位置。目前,超短脉冲激光器、纳米

脉冲紫外激光器能够用于直接刻蚀石英玻璃<sup>[5,7]</sup>,但去蚀率较低,如单独采用 157nm(F<sub>2</sub>)纳秒脉冲准分子激光器加工石英玻璃的刻蚀率小于 80nm/脉冲<sup>[8]</sup>, 193nm(ArF)纳秒准分子激光器加工石英玻璃的去蚀率小于 200nm/脉冲<sup>[9-10]</sup>,而 ZHANG 等人采用 157nm(F<sub>2</sub>)及 248nm(ArF)两种准分子激光双束复合方法的去蚀率有所提高但依然较低<sup>[10-11]</sup>。另一方面,超短脉冲激光相对于纳秒脉冲紫外激光器直接刻蚀石英玻璃的去蚀率更低,仅限于石英玻璃的精密加工,这类激光器较昂贵在工业生产中暂时无法被普及应用。对于廉价的普通脉冲激光器,由于石英玻璃对其发出的激光束吸收率较低,以 PIERREL 和 HAMDANI<sup>[12-14]</sup>为代表提出的激光诱导等离子体干刻法刻蚀石英玻璃,以 ZIMMER<sup>[15]</sup>为代表提出的激光背部湿刻法刻蚀石英玻璃,激光背部湿刻法刻蚀石英玻璃的刻蚀精度较高但去蚀率低下,而激光诱导等离子体干刻法刻蚀石英玻璃去蚀率也相对较低,且难以避免刻槽中出现微裂纹

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175229)

作者简介:丛启东(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光精密加工方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: forygf@263.net

收稿日期:2017-07-19;收到修改稿日期:2017-08-30

和崩边的现象。

针对目前常用的超快激光刻蚀、激光诱导等离子体刻蚀、纳秒紫外激光刻蚀石英玻璃去蚀率极其低下的问题,作者提出一种适合大范围刻蚀加工的、去蚀率高的石英玻璃刻蚀加工方法,即通过在石英玻璃表面制作一层钡化合物粉体覆盖层辅助 1064nm 红外激光从正面刻蚀石英玻璃;该方法能够实现较高的去蚀率,且工艺简单、加工成本低廉,可为激光加工石英玻璃的工业应用提供技术基础。

## 1 实验

### 1.1 实验设备和实验材料

实验装置主要包括  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  红外激光器、3-D 电控位移台及位移台电机驱动器、控制计算机。激光系统采用型号为 HGL-LMY500 的  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  红外激光器(波长:1064nm,激光脉冲工作频率:1Hz~100Hz,脉宽:0.2ms~10ms,最大平均输出功率:500W,电流:100A~400A);另外,为了避免在激光作用下石英玻璃背面会与接触材料发生作用,影响刻蚀效果,故加工时试样呈悬空放置。实验材料选用 JGS1 型熔融石英玻璃片,尺寸为 20mm×30mm×1mm,  $\text{SiO}_2$  占石英玻璃成分占比超过 99.6%,其余成分主要为金属杂志离子及羟基,在 190nm~2500nm 光波段内的透光性良好。实验前需要对石英玻璃进行前期处理,将石英玻璃试样放入无水乙醇中进行利用超声波清洗仪进行清洗,清洗 10min 后取出,然后低温烘干。

### 1.2 实验方法

先将经过研磨的钡化合物粉末均匀覆盖的石英玻璃上表面,并将覆盖在石英玻璃表面的化学材料粉末压致密、平整,通过前期的实验研究发现,当粉体覆盖层厚度为 0.6mm 时,3 种刻蚀方法刻蚀石英玻璃的刻蚀率都较高,故确定粉体覆盖层的厚度为 0.6mm,将激光束照射在石英玻璃的上表面,距离石英玻璃的上

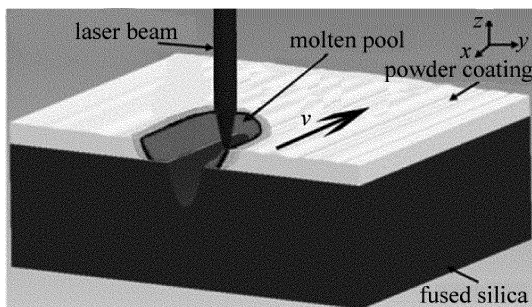


Fig. 1 Schematic diagram of laser etching fused silica assisted by barium compound powder coating

表面的离焦量为 2mm。图 1 为钡化合物粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的原理示意图。通过该方法可以在石英玻璃的上表面实现刻蚀。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同钡化合物粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的形貌对比

为了比较不同钡化合物粉体覆盖层材料辅助激光刻蚀石英玻璃刻槽形貌,选用了  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ,  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{BaCrO}_4$  3 种钡化合物作为粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃。覆盖层的厚度都为 0.6mm,激光电流为 195mA,脉宽为 0.7ms,频率为 45Hz,加工扫描次数为 1 次。图 2a~图 2c 中展示出了 3 种不同钡化合物粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的刻槽放大 50× 的电镜扫描形貌图,图 2d~图 2f 为对应刻槽边缘的局部放大 600× 的电镜扫描图。从图 2a 和图 2d 中可以看出,  $\text{BaCrO}_4$  作为覆盖层材料时,刻槽的边缘会出现严重的崩边现象,图 2b 和图 2e 示出了  $\text{BaCl}_2$  粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的刻槽边缘有细微的崩边现象,而图 2c 和图 2f 中  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的刻槽边缘非常平整,无明显的崩边现象,刻槽底面相对光滑,不存在明显的崩边和裂纹现象。

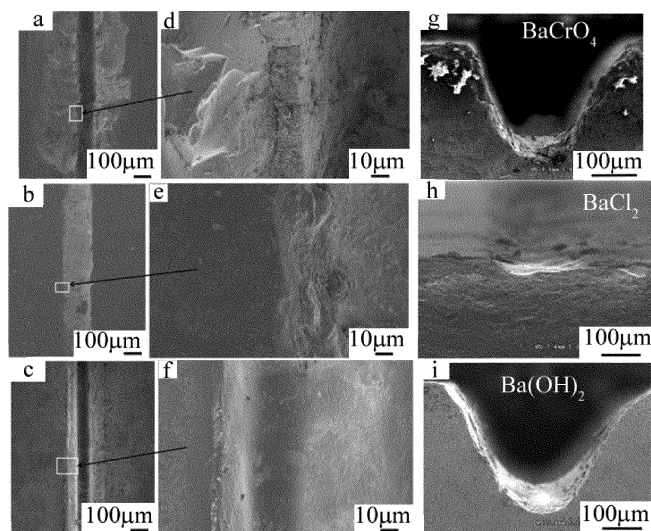


Fig. 2 Overlook and cross-sectional macrotopography of etching groove produced by laser beam and assisted by different powder coating materials  
a, d, g— $\text{BaCrO}_4$  powder coatings b, e, h— $\text{BaCl}_2$  powder coatings  
c, f, i— $\text{Ba}(\text{OH})_2$  powder coatings

图 2g~图 2i 是刻槽截面的电镜扫描图。可以看出,在相同的激光参量和加工工艺参量的条件下,  $\text{BaCrO}_4$  和  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  粉体作为覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的刻槽深度相对较大,而如图 2h 所示以  $\text{BaCl}_2$

粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的刻蚀深度相对较小。

## 2.2 刻蚀机理的研究

从图 2 可以看出,这 3 种钡化合物粉体材料作为覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃得到的刻槽形貌差异较大,初步判断可能是因为不同的刻蚀机理导致的,为了找到 3 种不同钡化合物粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的刻蚀机理,以下对这 3 种刻蚀方法的刻蚀机理进行研究。

### 2.2.1 BaCrO<sub>4</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的机理研究

图 3 是未经过清洗的刻蚀槽底部物质放大 5000 $\times$  的 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD) 微观形貌图。可以看到,刻蚀槽底部表面非常粗糙,附着了一层较密集的熔渣,且表面存在微裂纹。以 BaCrO<sub>4</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的过程中,当激光照射在 BaCrO<sub>4</sub> 粉体上时激光照射区域出现绿色火焰,能够看到剧烈的燃烧现象,听到清脆的连续的微爆炸声音,这是由于 BaCrO<sub>4</sub> 易燃,激光照射在 BaCrO<sub>4</sub> 表面时,其表面温度会急剧上升, BaCrO<sub>4</sub> 会发生剧烈燃烧和连续不断的微爆炸并放出热量,从图 3 中可以看出,刻槽表面附着了一层熔渣,这些熔渣是在高能量密度的激光束辐射和 BaCrO<sub>4</sub> 剧烈燃烧以及微爆炸放热共同作用下形成的,当石英玻璃吸收大量激光能量并且超过其分子键能时,激光会破坏石英玻璃的空间结构,使得分子不再有规律的排列;由于激光作用时间极短,在高温条件下刻蚀产物会迅速冷却,大量熔渣覆盖在石英玻璃刻槽表面。刻槽表面会出现微裂纹和崩边现象,是由于 BaCrO<sub>4</sub> 的连续微爆炸导致的。

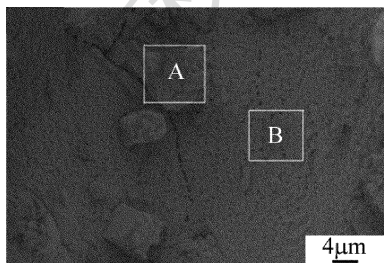


Fig. 3 SEM micromorphology of etching groove assisted by BaCrO<sub>4</sub> powder coating

为了进一步对该方法去蚀机理的研究,需要对刻槽底面的刻蚀产物进行能谱(energy dispersive spectrometer, EDS)分析,分别对图 3 中区域 A 和区域 B 两个矩形区域进行 EDS 分析,其中区域 A 为刻槽表面附着的颗粒状物质,区域 B 为刻槽表面附着的熔融物质。图 4 示出了区域 A、B 的能谱测试结果。从图 4

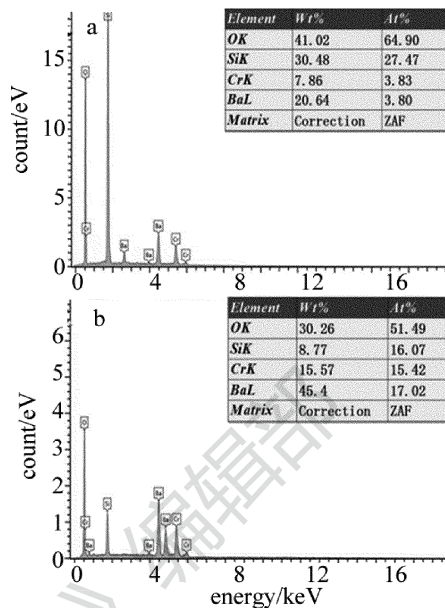


Fig. 4 EDS images of area A and B in Fig. 3  
a—area A b—area B

中可以看出,区域 A、区域 B 的能谱测试结果都只出现了 Ba, Si, O 以及 Cr 4 种谱峰,由于这 4 种元素都是石英玻璃主要成分 SiO<sub>2</sub> 和覆盖层材料 BaCrO<sub>4</sub> 的组成元素,故激光刻蚀过后刻蚀产物中没有新的元素出现;值得注意的是,通过比对区域 A、区域 B 的能谱图中各元素的质量分数和原子分数发现,区域 A 中的 Si, O 元素含量明显比 Ba 和 Cr 含量高很多,初步推测区域 A 中的颗粒状物质为石英玻璃的碎屑,而区域 B 中仅有 O 元素的含量较其它元素高,初步判断区域 B 中是 Si, O, Cr 以及 Ba 4 种元素中两种或多种元素组成的多种化合物,以上推测还有待进一步验证。

根据以上对 BaCrO<sub>4</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃刻蚀产物的 EDS 分析,可确定刻槽底部表面的元素分布情况,但不能确定刻槽表面物质的具体成分,为了进一步对刻蚀机理进行分析,需要对 BaCrO<sub>4</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃刻蚀产物进行 XRD 分析,图 5 是 BaCrO<sub>4</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃刻蚀产物的 X 射线衍射图谱。通过 X 射线对刻槽表面物质进行检测,并与 PDF 标准卡进行对比,可以发现 X 射线衍射图谱出现了 3 类图谱,由分析可知,分别代表 BaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>, Ba<sub>3</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, BaO, BaSiO<sub>3</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6 种物质,其中 SiO<sub>2</sub> 是石英玻璃的主要成分,而出现 BaO 是因为 BaCrO<sub>4</sub> 在 850 $^{\circ}$ C 左右的时候会分解为 BaO 和 CrO<sub>3</sub>, 化学反应方程式见(1)式,而生成的 BaO 在高温条件下会与石英玻璃的主要成分 SiO<sub>2</sub> 发生化学反应并生成 BaSiO<sub>3</sub>, 化学反应方程式

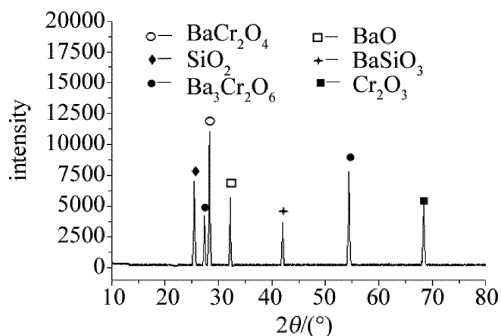
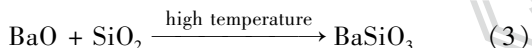
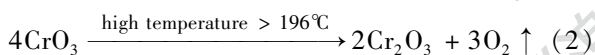
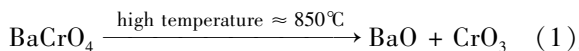


Fig. 5 XRD image of etching products assisted by BaCrO<sub>4</sub> powder coating 如(3)式所示,该化学反应起到直接去蚀石英玻璃的作用;刻蚀产物中不存在 CrO<sub>3</sub>,而只有 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 存在是因为 CrO<sub>3</sub> 在温度超过 196℃ 的条件下会分解成 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 O<sub>2</sub>,其中 O<sub>2</sub> 是气体故 XRD 无法检测到;刻蚀产物中存在 BaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 和 Ba<sub>3</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 是因为 BaCrO<sub>4</sub> 易燃,在加工的过程中可以观察到当激光照射到 BaCrO<sub>4</sub> 粉体覆盖层上的时候,会立即发生剧烈的燃烧现象,出现绿色的火焰,该化学反应生成 BaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 和 Ba<sub>3</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>6</sub>。



通过对刻槽表面区域 A、B 的 EDS 测试结果以及对刻槽底部刻蚀产物的 XRD 测试分析可知,刻槽内部所有物质主要包括 BaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>, Ba<sub>3</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, BaO, BaSiO<sub>3</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 这 6 种物质,图 3 中区域 A 是一个棱角分明的颗粒,图 4 中示出了区域 A 的 EDS 测试结果中 Si 和 O 元素的占比较其它元素高很多,这说明区域 A 中的颗粒主要成分为 SiO<sub>2</sub>,区域 A 中的颗粒是崩裂飞溅后附着在刻槽表面的石英玻璃碎屑;而区域 B 是刻槽表面的熔融物质,如图 4 所示,从区域 B 的 EDS 测试结果可知,该区域的主要元素成分 Ba, Si, O 以及 Cr 4 种谱峰,结合刻槽产物 XRD 分析得到的产物刻蚀,刻槽表面覆盖的一层熔融物质是由熔融状的 BaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>, Ba<sub>3</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, BaO, BaSiO<sub>3</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6 种物质中某种或多种物质组成的。

通过上述分析可知, BaCrO<sub>4</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的刻蚀机理,当激光照射在 BaCrO<sub>4</sub> 粉体覆盖层表面,覆盖层能够有效阻止激光直接通过石英玻璃,与此同时由于 BaCrO<sub>4</sub> 易燃,故 BaCrO<sub>4</sub> 会发生剧烈燃烧并放出大量的热传递在石英玻璃上表面,激光照射区域的石英玻璃上表面温度急剧升高,当激光能量密度超过某特定阈值时,石英玻璃会通过气化实现

去蚀,同时由于 BaCrO<sub>4</sub> 连续微爆炸会导致崩边和微裂纹。另一方面,在刻蚀过程中 BaCrO<sub>4</sub> 在 850℃ 条件下分解产生的 BaO 在高温条件下会与石英玻璃的主要成分 SiO<sub>2</sub> 发生化学反应生成 BaSiO<sub>3</sub>,达到直接去蚀石英玻璃的作用。

2.2.2 BaCl<sub>2</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的机理研究 图 6 是 BaCl<sub>2</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃未经清洗的刻槽底面放大 5000× 的微观图。可以看出,刻槽表面有少量熔渣,但是表面无裂纹现象,相对比较光滑。

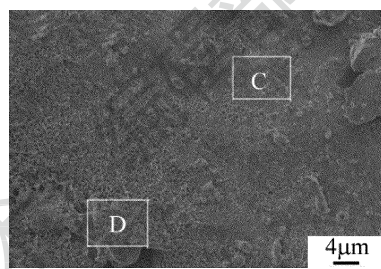


Fig. 6 SEM micromorphology of etching groove assisted by BaCl<sub>2</sub> powder coating

对如图 6 所示的刻槽底部表面区域 C、区域 D 进行 EDS 能谱分析,图 7 所示为 EDS 能谱分析结果。从图 6 中可以看出,区域 C、区域 D 中都存在 Ba, Cl, Si 和 O 4 种元素,其中如图 7a 所示, C 区域中 Ba 元素和 Cl 元素的质量和原子分数较高,说明区域 C 中主要物质可能为 Ba 和 Cl 两种元素组成的化合物;而图 7b 中可以看出区域 D 中 Si 和 O 元素的含量较高,说明区域 D 中主要物质可能是 Si 和 O 两种元素组成的化合物。

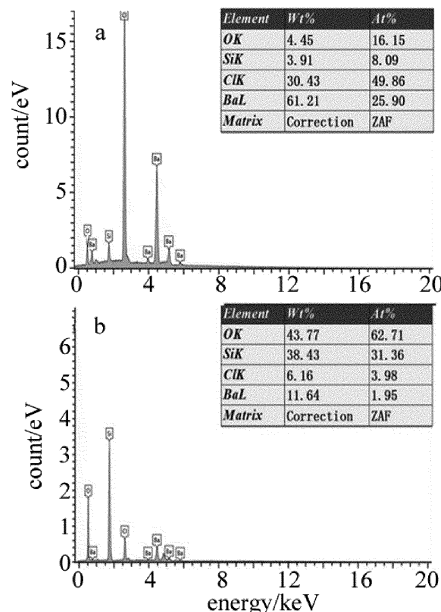


Fig. 7 EDS images of area C and D in Fig. 6 a—area C b—area D

通过 XRD 测试 BaCl<sub>2</sub> 覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃刻槽底部表面物质,图 8 所示为 X 射线衍射图谱。可以发现刻蚀产物中仅仅出现了两种衍射峰,由分析可知,两种衍射峰分别代表为 BaCl<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub>,该两种物质分别为覆层材料的主要成分和石英玻璃的主要成分,可以说明该过程中无化学反应起到刻蚀作用,石英玻璃主要是通过物理作用机理去蚀的。

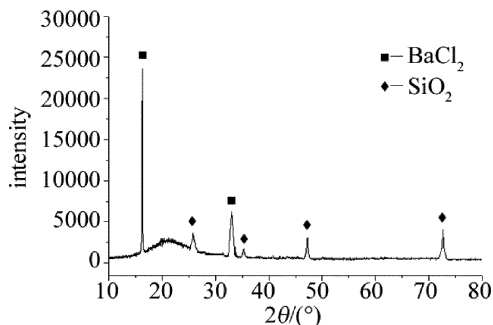


Fig. 8 XRD image of etching products assisted by BaCl<sub>2</sub> powder coating

BaCl<sub>2</sub> 沸点为 1560℃ 左右,激光辐射下其温度会不断升高,当温度达到覆盖层材料气化温度时会发生气化,石英玻璃也由于空间结构被破坏发生熔化、气化,且由于 BaCl<sub>2</sub> 的沸点较 SiO<sub>2</sub> 的沸点低很多,BaCl<sub>2</sub> 的气化会带走一部分熔化的石英玻璃,故如图 6 所示,相对于 BaCrO<sub>4</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃得到的刻槽表面的熔渣量,BaCl<sub>2</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃得到的刻槽表面熔渣量少很多。

2.2.3 Ba(OH)<sub>2</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的机理研究 图 9 是 Ba(OH)<sub>2</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃刻槽底面放大 5000× 的微观形貌图。可以看出刻槽表面熔渣较少,且无裂纹现象。对如图 9 所示刻槽底部表面区域 E 附着的熔渣进行 EDS 能谱分析,图 10 中展示出了区域 E 的 EDS 能谱分析结果。从图 10 中可以看出,出现了 3 种类型的谱峰,分别表示 O, Si, Ba 3 种元素,其中 Ba 和 O 元素的含量相对较高,初步能够判定区域 E 中的主要物质为 Ba 和 O 组成的某种物质。

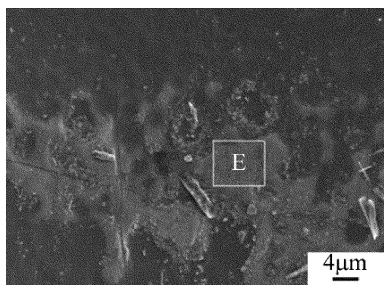


Fig. 9 SEM micromorphology of etching groove assisted by Ba(OH)<sub>2</sub> powder coating

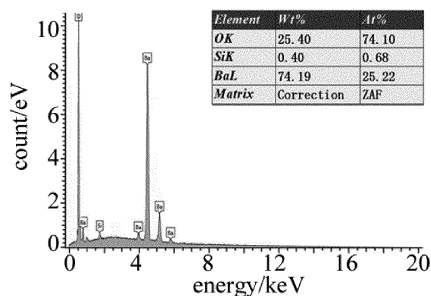


Fig. 10 EDS images of area E in Fig. 9

图 11 所示为激光诱导 Ba(OH)<sub>2</sub> 化学反应刻蚀石英玻璃的刻蚀产物的 X 射线衍射图谱。通过 X 射线对刻蚀产物进行测试,发现 X 射线衍射图谱中出现了 3 种类型的衍射峰,分析得出这 3 种衍射峰分别表示 BaO, BaSiO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>。X 射线图谱中出现 BaO 是因为 Ba(OH)<sub>2</sub> 在超过 600℃ 的高温条件下分解为 BaO 和 H<sub>2</sub>O,化学反应方程式如下式所示:

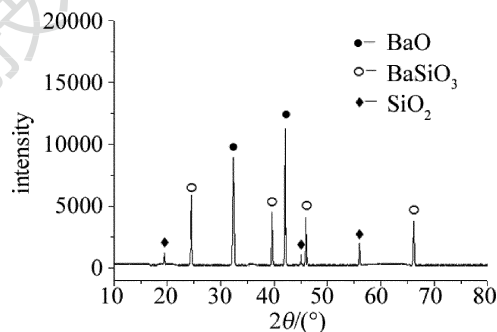
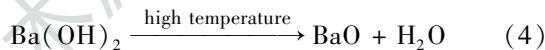
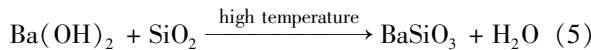


Fig. 11 XRD image of etching products assisted by Ba(OH)<sub>2</sub> powder coating

而在高温条件下 H<sub>2</sub>O 被蒸发到空气中,故无法被 XRD 检测到;X 射线衍射图谱中出现 BaSiO<sub>3</sub> 是因为 Ba(OH)<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 在高温条件下会发生化学反应,并生成 BaSiO<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sup>[18]</sup>,化学反应方程式如下式所示:



此外, BaO 和 SiO<sub>2</sub> 在高于 800℃ 的高温条件下会发生化学反应并生成 BaSiO<sub>3</sub>,化学反应方程式见(3)式。

结合刻槽中刻蚀产物的 XRD 能谱分析结果与上述图 9 中区域 E 的 EDS 检测结果进行分析,由于区域 E 中的物质成分包含于刻蚀产物成分,根据区域 E 的 EDS 能谱分析结果中 Ba 和 O 元素的含量较高,可推断区域 E 中的主要成分为 BaO,这是 Ba(OH)<sub>2</sub> 在高温条件下分解后产生 BaO,而 BaO 的沸点超过了 2000℃,且化学性质稳定,故 BaO 会大量残留在刻槽表面。而通过化学反应方程(3)式和(5)式产生的

BaSiO<sub>3</sub> 的沸点相对较低,故大部分 BaSiO<sub>3</sub> 在刻蚀过程中被气化到空气中,通过 XRD 谱检测到 BaSiO<sub>3</sub> 的量较少。

综合上述讨论可知,Ba(OH)<sub>2</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的刻蚀过程中,Ba(OH)<sub>2</sub> 以及其分解生成的 BaO 在高温条件下都会与石英玻璃的主要成分 SiO<sub>2</sub> 发生化学反应生成 BaSiO<sub>3</sub>,该过程起到直接去蚀石英玻璃的作用,由于该刻蚀方法的刻蚀机理主要为化学反应刻蚀,故得到的刻槽表面无明显的裂纹和裂损现象。

### 3 结论

提出一种新的利用普通脉冲红外激光刻蚀石英玻璃的方法,即钡化合物辅助激光刻蚀石英玻璃,介绍了 BaCrO<sub>4</sub>,BaCl<sub>2</sub> 和 Ba(OH)<sub>2</sub> 3 种不同钡化合物粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的刻蚀效果,通过 EDS 和 XRD 测试分析辅助分析该刻蚀过程的刻蚀机理。通过研究发现:BaCrO<sub>4</sub> 粉体在激光照射后会剧烈燃烧和微爆炸并放出大量的热,能够有效辅助激光去蚀石英玻璃,但由于 BaCrO<sub>4</sub> 在激光照射下发生微爆炸会导致应力集中,刻蚀表面会出现严重的崩边和微裂纹现象,另一方面,由于 BaCrO<sub>4</sub> 分解产生的 BaO 在高温条件下与石英玻璃主要成分 SiO<sub>2</sub> 发生化学反应生成 BaSiO<sub>3</sub>,起到直接去蚀石英玻璃的作用,故去蚀率较高;BaCl<sub>2</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃过程中无化学反应起到刻蚀作用,该刻蚀过程仅仅是通过物理作用实现去蚀的,故该方法去蚀效率较低;Ba(OH)<sub>2</sub> 粉体覆盖层辅助激光刻蚀石英玻璃的过程中,Ba(OH)<sub>2</sub> 以及其分解生成的 BaO 在高温条件下都会与石英玻璃的主要成分 SiO<sub>2</sub> 发生化学反应生成 BaSiO<sub>3</sub> 实现石英玻璃的去蚀,该刻蚀过程主要是化学作用实现去蚀的,所以去蚀效率较高,且无明显裂损现象。通过对比 3 种不同钡化合物粉体覆盖层辅助激光石英玻璃的刻蚀效果可知,存在化学反应作用去蚀的刻蚀方法去蚀率明显更高,说明存在化学反应去蚀作用的钡化合物辅助激光刻蚀方法能够有效提高去蚀率。

本文中的研究将对高效率激光刻蚀石英玻璃提供

一定的参考。

### 参考文献

- [1] GUO X G, ZHAI Ch H, ZHANG L, *et al.* Nano glass processing performance of optical quartz glass[J]. *Optical Precision Engineering*, 2014, 11(11):2959-2966(in Chinese).
- [2] ZHAI L B, ZHAO H L, CHEN J M. Three frequency laser micromachining of glass groove[J]. *Applied Laser*, 2006, 26(6):365-368(in Chinese).
- [3] LIANG D Zh, WANG M, DU Ch L, *et al.* Research on microchannel of silica glass fabricated by laser-induced backside wet etching[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(4):174-177(in Chinese).
- [4] QIN Sh F, YUAN F, JIANG A R. Research on laser cutting technique of quartz pendulum[J]. *Navigation, Positioning and Timing*, 2015, 2(3):102-106(in Chinese).
- [5] BENDERLY D. Laser allows single-step marking on automotive glass[J]. *Industrial Laser Solution*, 2016, 31(3):12-15.
- [6] YAN G Sh, ZHU J G, HUANG Y L, *et al.* Fabrication of micro-scale gratings for moire method with a femtosecond laser[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2016, 6(4):171-175.
- [7] DAI Y T, XU G, CUI J L. 3-D micro ablation technique of transparent materials using deep ultraviolet laser[J]. *Applied Laser*, 2009, 29(5):411-414(in Chinese).
- [8] IHLEMANN J. Nanosecond and femtosecond excimer laser ablation of fused silica[J]. *Applied Physics*, 1992, A54(4):363-368.
- [9] IHLEMANN J. UV-laser ablation of fused silica mediated by solid coating absorption[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2007, 6458:701140.
- [10] ZHANG J, SVIGIDKA K, TAKAHASHI T, *et al.* Dual-beam ablation of fuse silica by multiwavelength excitation process using KrF excimer and F<sub>2</sub> lasers[J]. *Applied Physics*, 2000, A71(1):23-26.
- [11] WANG S. A study on laser etching and polishing quartz glasses technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012:33-34(in Chinese).
- [12] PIERREL L, MARTIN E, KLAUS Z. Laser-induced front side etching of fused silica with KrF excimer laser using thin chromium lasers[J]. *Applications and Material Science*, 2012, 209(6):1114-1118.
- [13] HAMDANI A H, ANSAR A, AKHTER R, *et al.* Laser induced backside dry etching of BK-7 and quartz in vacuum[J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 261(510):261-264.
- [14] TSVETKOV M Y, YUSUPOV V L, MINAEV N V, *et al.* On the mechanisms of single-pulse laser-induced backside wet etching[J]. *Optics and Laser Technology*, 2017, 88:17-23.
- [15] ZIMMER K, BHME R, RUTHE D, *et al.* Backside laser etching of fused silica using liquid gallium[J]. *Applied Physics*, 2006, A84(4):455-458.