

## 定量相位成像技术在超快激光加工检测中的应用

李昌恒<sup>1,2</sup>, 崔省伟<sup>1,2\*</sup>, 姚晓天<sup>1,2</sup><sup>1</sup>河北大学物理科学与技术学院, 光信息技术创新中心, 河北 保定 071002;<sup>2</sup>河北省光学感知技术创新中心, 河北 保定 071002

**摘要** 采用定量相位成像技术对飞秒激光在玻璃材料内部加工的空腔结构进行定量相位成像检测。首先通过改变飞秒激光的脉冲能量在玻璃内部制作了不同结构的空腔, 然后使用定量相位成像装置对样品进行了成像表征。结果显示: 定量相位成像技术在对内部空腔进行成像的同时, 还可以探测到玻璃空腔周围光学性质改变的区域。研究了玻璃内部有无掺杂对加工结果的影响, 并分析总结了飞秒激光在玻璃内部加工的三维模型。定量相位成像技术既可以对样品进行无损检测, 有效提高样品的检测效率, 又可以定量测量样品的光学特性, 因此, 该技术在激光加工检测领域中具有广阔的应用前景。

**关键词** 激光技术; 定量相位成像; 飞秒激光; 激光加工; 光学改性; 玻璃掺杂

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221494

## 1 引言

近年来, 激光技术在各领域的应用愈发广泛, 其中以飞秒激光为代表的超短脉冲激光技术为研究实验反应和变化过程中的超快现象提供了一种新思路<sup>[1-2]</sup>。飞秒激光加工过程中会发射飞秒量级的超短脉冲, 当脉冲通过聚焦物镜聚焦到透明介质材料表面或内部时, 由于飞秒激光极高的瞬时功率, 这些超短脉冲在激光焦点位置处的能量密度极高, 从而形成极强的激光场, 并与材料发生非线性作用<sup>[3]</sup>, 在激光焦点处形成大范围的等离子体结构, 当该区域的密度较大时, 透明介质材料内部就可以形成永久性的折射率调制<sup>[4-5]</sup>。相较于连续激光加工, 飞秒激光加工的过程主要集中于激光焦点附近, 其与材料的作用时间特别短, 可以很好地改善甚至消除加工过程中由激光反应带来的热效应, 实现“冷加工”<sup>[6-7]</sup>。同时, 飞秒激光加工的适用性很广, 加工过程是真三维加工, 具有很高的可设计性和可控性<sup>[8]</sup>。

透明介质材料内部的折射率调制主要取决于入射激光的光强, 当入射激光的光强比较低时, 能量可以均匀地作用于透明介质材料, 此时激光作用区域内的材料会发生局部反应, 作用区域未出现明显损伤, 但光学性质会发生变化(折射率及密度会增大)。材料改性后的折射率变化表现为各向同性的变化, 这种折射率变化类型被称为 I 型折射率调制, 可用于在玻璃内部直写波导结构。当入射激光脉冲能量较大时, 在焦点附

近可以极快地产生等离子体结构, 此区域内的物质及能量会以一种复合型冲击波的形式从激光焦点作用位置向四周扩张, 最终使焦点处形成空洞, 折射率也随之降低<sup>[9]</sup>, 而处于加工位置附近的介质材料由于受到来自焦点位置的冲击波的作用, 密度会增加, 从而导致折射率增大, 这种折射率调制被称作 II 型折射率调制。本文测试分析的玻璃内部空腔结构就是在高强度 II 型损伤机制下写入的。

玻璃材料的折射率可近似看作是各组氧化物折射率的总和, 与材料的极化率、密度成正比。当石英玻璃无掺杂时, 其主要成分为二氧化硅。作为石英的非晶态, 熔融石英具有极佳的光谱透过性和化学稳定性, 被广泛应用于晶体振荡器、磨料、铸造材料、陶瓷和水泥等。向玻璃中掺杂氧化钙、氧化钠等改性氧化物, 可以降低玻璃材料的软化点, 同时可以增大材料的离子导电性及热膨胀特性。与钙钠玻璃相比, 硼酸盐玻璃的热膨胀系数小<sup>[10]</sup>, 性质相对稳定。硼酸盐玻璃主要用于光学玻璃、精密实验用具玻璃等的生产制造。使用飞秒激光直写多组分玻璃时, 其折射率变化可以是正的、负的或不均匀的, 表现出对玻璃成分的强烈依赖性<sup>[11]</sup>。

在现阶段, 研究人员大都采用原子力显微镜对飞秒激光刻蚀加工样品进行形貌检测。该方法虽然可以对样品形貌进行纳米级的精准测量, 但检测时间较长且成本较高, 而且只能检测表面刻蚀的物理尺寸, 对于透明介质材料内部加工形貌的检测有着很大的局限

收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2023-01-17; 录用日期: 2023-02-13; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(62105091)、河北省自然科学基金(F2021201016)

通信作者: \*shengwei@hbu.edu.cn

性。使用明场显微镜观测,只能看到加工处的边缘,不能看到内部的折射率变化。随着光学三维测量技术的日益成熟<sup>[12-13]</sup>,其在众多测量技术中脱颖而出。其中,定量相位成像技术是一种能够获得透明介质材料相位信息的成像方法。基于光学干涉原理,该方法使激光穿过加工区域,然后通过相位成像的方法来表征加工区域的属性<sup>[14-15]</sup>。该技术可以对加工区域周围光学性质发生改变的区域进行检测,并进行定量分析。

定量相位成像是一种基于双光束干涉测量的光学显微成像技术。传统的明场显微镜对高透过的散射介质或样品内部微小的缺陷结构进行探测时,采用的是直接测量透射光强度的探测方式,无法得到良好的探测结果;而定量相位成像技术通过探测光与给定参考光的干涉将探测光的相位变化转化为强度变化,获得样品的折射率信息和厚度信息<sup>[16]</sup>,从而实现对微小结构的精确测量。美国中佛罗里达大学的 Dogariu 研究小组<sup>[17-18]</sup>在 2019 年报道了基于米氏散射原理和定量相位成像的技术,对光束通过亚波长粒子后的相位延迟进行了理论分析及实验验证。西北工业大学的邱江磊研究团队<sup>[19]</sup>在 2020 年使用定量相位成像技术获取了近场区域介质样品的强度和相位图像,进而实现了对介质样品相关物理参量的测量和表征。南京理工大学的左超研究团队<sup>[20]</sup>在 2022 年报道了基于环形照明傅里叶显微术的自适应光学定量相位成像技术,该技术只需要 6 张原始图像就可以重建图像,进行活细胞的实时成像;他们采用该方法实现了 HeLa 细胞的长期和宽视场成像。凭借高效、精准、高灵敏度、非接触,以及能够对目标物体结构进行纳米级精度测量的优势,定量相位显微成像技术已被广泛应用于红细胞检测<sup>[21]</sup>、癌细胞诊断<sup>[22]</sup>、神经细胞观测<sup>[23]</sup>等领域的研究,并在工业检测<sup>[24]</sup>及生物医学<sup>[25]</sup>等领域大放异彩。

目前在超快激光加工领域尚未有与定量相位成像相关的研究。鉴于此,笔者对飞秒激光加工的玻璃样品进行了定量相位成像测量,结果显示:该方法在探测

透明介质材料内部所加工空腔的尺寸、加工区域周围折射率改变区域的形貌以及验证不同掺杂物质对玻璃折射率的影响等方面有着良好的效果。

## 2 实验分析

### 2.1 飞秒激光在有掺杂玻璃内部的加工

飞秒激光在钙钠玻璃内部加工空腔的过程如图 1(a)所示,实验中使用的飞秒激光波长为 1030 nm,脉宽为 380 fs,重复频率为 200 kHz。在加工过程中,将待加工样品固定在电动三维位移平台上,位移平台的移动速度为 50  $\mu\text{m}/\text{s}$ ;通过调节三维位移平台的垂直高度来保证激光聚焦在透明介质材料内部。整套飞秒激光加工系统固定于摆杆气浮平台上,以避免环境振动对加工造成影响。

首先对有掺杂的钙钠玻璃载玻片进行超声处理,将其表面的碎屑和杂质去除,然后用乙醇将其擦净并将其固定在三维位移平台上,采用不同的脉冲能量进行加工。每加工完一条空腔后,将载物台调至初始位置,同时横向平移 1 cm(以确保相邻的两组加工区域互不影响),并改变脉冲能量来加工第二条空腔。实验中分别使用 5 组不同的脉冲能量(1.5~4.7  $\mu\text{J}$ ,能量间隔为 0.8  $\mu\text{J}$ ),依次加工 5 条空腔结构。钙钠玻璃内部的加工区域会出现线状空腔,并且空腔的两侧会出现光学性质改性的致密区域。

图 1(b)是在明场显微镜下观测到的钙钠玻璃内部的空腔结构,可以看到中心处为管状结构(图右侧较窄的虚线区域),边缘清晰,宽度约为 5.75  $\mu\text{m}$ 。在管状结构两侧分别有两条平行的宽带结构(图左侧较宽的虚线区域),宽度约为 23.23  $\mu\text{m}$ ,该区域的透光率略低于未加工区域,因此边界的清晰度较低。在 20 倍物镜聚焦下,激光作用区域的光斑尺寸在 1  $\mu\text{m}$  左右,而实验中观测到的管状及带状结构的宽度远大于光斑尺寸,这说明在加工区域两侧出现了由加工过程中的热应力波与机械波扩散导致的改性区域。采用明场显微镜

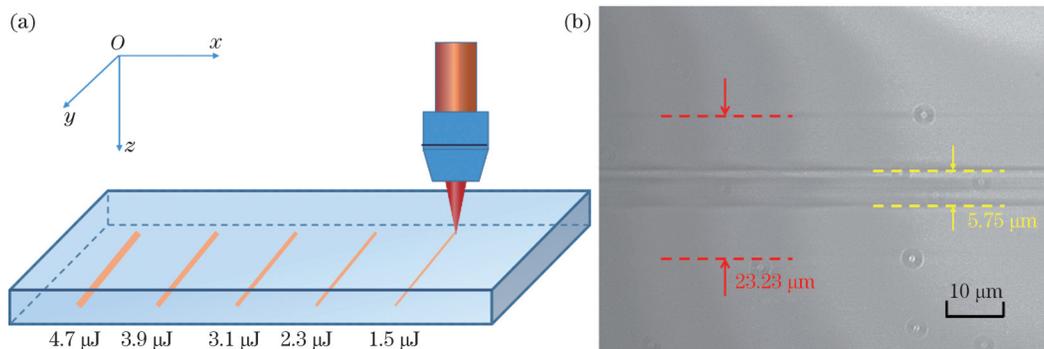


图 1 飞秒激光在钙钠玻璃内部加工空腔结构示意图以及空腔结构。(a)使用飞秒激光器在钙钠玻璃内部加工示意图;(b)明场显微镜下观测到的 4.1  $\mu\text{J}$  下加工的空腔结构

Fig. 1 Diagram of femtosecond laser processing cavity inside calcium-sodium glass and the cavity structure. (a) Schematic of processing cavity inside calcium-sodium glass using femtosecond laser; (b) cavity structure machined at 4.1  $\mu\text{J}$  observed under bright-field microscope

虽然可以勉强观测到加工位置的结构层次区别,但该区域的折射率变化却无法观测到。为了探索加工区域附近的形貌与折射率变化,笔者使用定量相位成像系统对样品进行定量表征分析。

基于马赫-曾德尔干涉仪的透射型定量相位成像实验装置如图 2 所示。在该实验装置中,光源采用中心波长为 633 nm 的线偏振氦-氖激光器。激光首先经过透镜 F1 和 F2 进行准直扩束,再通过半波片(HWP)进行偏转角的调节,经偏振分光镜(PBS)分光后获得两束相互正交的线偏振光  $\hat{e}_{//}$  和  $\hat{e}_{\perp}$ ,其中一束作为参考光  $\epsilon_r(\rho)$ ,另外一束通过目标物体作为探测光  $\epsilon_p(\rho)$ ,使其携带有目标物体的相位信息。探测光依次通过透镜 F3、待测物体和物镜(OL,放大倍率为 20 倍,NA=

0.4)及非偏振分光棱镜(BS)后,与参考光合束,获得叠加光场  $E_s(\rho)$ 。叠加光场依次通过  $45^\circ$  角四分之一波片(QWP)和可旋检偏器(P),最后被 CCD 记录(其中检偏器和 CCD 可以用偏振相机代替),获得 4 幅偏振图(角度分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$ )。正交线偏振的叠加光场可以表示为

$$E_s(\rho) = \epsilon_r(\rho) + \epsilon_p(\rho) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a \exp(i\varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - a \sin \varphi \\ a \cos \varphi \end{bmatrix} + a \sin \varphi \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $a$  和  $\varphi$  分别代表样品的振幅和相位。叠加光场通过  $45^\circ$  角四分之一波片后,参考光和探测光转换为具有相反自旋角动量的圆偏振态,此时叠加光场可以表示为

$$E_s(\rho) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ a \exp(i\varphi) \end{bmatrix} = a \exp\left(i\frac{\varphi}{2}\right) (1-i) \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \end{bmatrix} + \frac{(1-a)}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式(2)中等号后第一部分代表线偏振,第二部分表示圆偏振。在目标物体既有相位调制也有振幅调制的情况下,其叠加光场可以看作是椭圆偏振态。由于圆偏振各方向的分量相等,所以线偏振的方向只取决于相位调制,而叠加光场偏振态的

椭圆度只受目标振幅调制的影响。因此,该方案可以将探测场的相位和振幅分别编码到叠加光场偏振态的方向和椭圆度上。实验中采用检偏器获得叠加光场的偏振态,进而获得样品的相位信息。

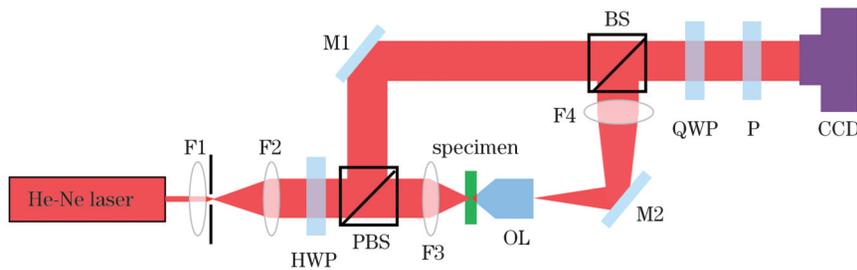


图 2 马赫-曾德尔定量相位成像实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of Mach-Zehnder quantitative phase imaging

由于本系统采用聚焦光束对样品进行照明,即引入了附加的球面相位,因此在样品后方使用物镜 OL 和透镜 F4 组合对聚焦光束的球面波进行补偿,将物平面上的球面波准直成平面波后再进行成像。这种方法可抵消球面波引起的相位差,只保留样品的相位信息。为了获得准确的样品相位信息,先在不放置样品(此时光波通过样品位置时仍按照平面波传播)的情况下对系统进行校正,但受系统误差的影响,实验获得的相位始终带有一定的曲率(即球面相位)。因此,将其视作背景相位,在后续实验中进行相位补偿,进而得到准确的样品相位。

理论上,在三个不同的偏振方向上进行测量即可获得精确的相位及强度。为了进一步减小噪声和测量

误差的影响,通过控制检偏器的旋转角  $\chi$  为  $0$ 、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$  和  $3\pi/4$ ,分别得到了 4 个偏振角度的光强图,以此可进一步获得相位信息。定量相位成像的相位恢复公式可表示为

$$\varphi(\rho) = \arctan \left[ \frac{I(\rho, \chi = \pi/4) - I(\rho, \chi = 3\pi/4)}{I(\rho, \chi = 0) - I(\rho, \chi = \pi/2)} \right], \quad (3)$$

式中:  $I(\cdot)$  表示光强。

在实验中,通过改变半波片的偏转角度可以控制偏振分光镜的分光比,从而达到最佳的干涉成像效果及探测灵敏度。此外,值得一提的是,使用偏振相机代替检偏器和 CCD,可以实现单帧定量相位成像<sup>[26]</sup>。像素分辨率(即相机中单像素点对应的成像大小)可通

过对标尺进行成像获得。实验中,  $10\ \mu\text{m}$  标尺对应的像素点数为 43 个, 即每个像素点对应的尺寸为  $0.233\ \mu\text{m}$ , 但该尺寸小于阿贝衍射极限  $[0.61\lambda/(n\sin\alpha) = 0.61\lambda/NA = 965\ \text{nm}]$ ,  $n$  表示物镜与样品之间填充介质的折射率, 故本实验中的横向分辨率仍然受到阿贝衍射极限的制约, 最小分辨率为  $965\ \text{nm}$ 。

图 3(a) 是飞秒激光加工的钙钠玻璃内部的定量相位成像结果。从相位图中可以清晰地看到钙钠玻璃内部加工区域呈现低相位, 加工区域两侧呈现高相位, 中心处有空腔结构。这种相位结构的形成原因如下: 飞秒激光加工后, 激光焦点的聚焦位置发生“微爆炸”, 玻璃内部形成空腔, 导致激光焦点直接作用的区域呈现低相位; 与此同时, 原来空腔处的物质向周围扩散, 在空腔内壁处形成一层折射率较高的致密物质, 空腔边缘的相位急剧升高, 出现明显的相位凸起。空腔边缘外部两侧对称出现了较高相位(其相位值介于未加工区域与空腔边缘区域的相位之间), 这是因为“微爆炸”发生时的热力波和机械波引起的应力导致空腔边

缘外侧出现了较为规则的半圆形折射率改性区域。图 3(b) 所示曲线是图 3(a) 横截面处的相位曲线图, 从该图可以看出在横截面处的相位变化近似半圆形。将图 3(b) 所示相位曲线凸起的两峰值顶点之间的距离  $d$  作为空腔的宽度, 半圆形的直径  $D$  作为改性区域的宽度。当单脉冲能量为  $4.1\ \mu\text{J}$  时,  $d$  约为  $25\ \mu\text{m}$ ,  $D$  约为  $93\ \mu\text{m}$ , 空腔边缘凸起处的相位值约为  $0.9\ \text{rad}$ , 空腔中心凹陷处与图 3(b) 中蓝色半圆曲线顶点位置处的相位差值约为  $0.7\ \text{rad}$ 。理论上, 即使目标样品具有较复杂的振幅和相位调制, 该方法的相位测量精度仍能保持为  $\lambda/467$ , 即  $0.01346\ \text{rad}$ <sup>[26]</sup>。在本实验中, 经过多次测量并取平均后得到的实际误差为  $0.04382\ \text{rad}$ 。实验中光学元器件误差、激光散斑等因素的共同影响是实际误差增大的主要原因。

图 3(c) 中的两条曲线分别表示  $D$  和  $d$  随飞秒激光脉冲能量的变化。可以看出, 折射率改性区域的直径和空腔宽度均与飞秒脉冲能量成线性关系, 且斜率接近 3:1。

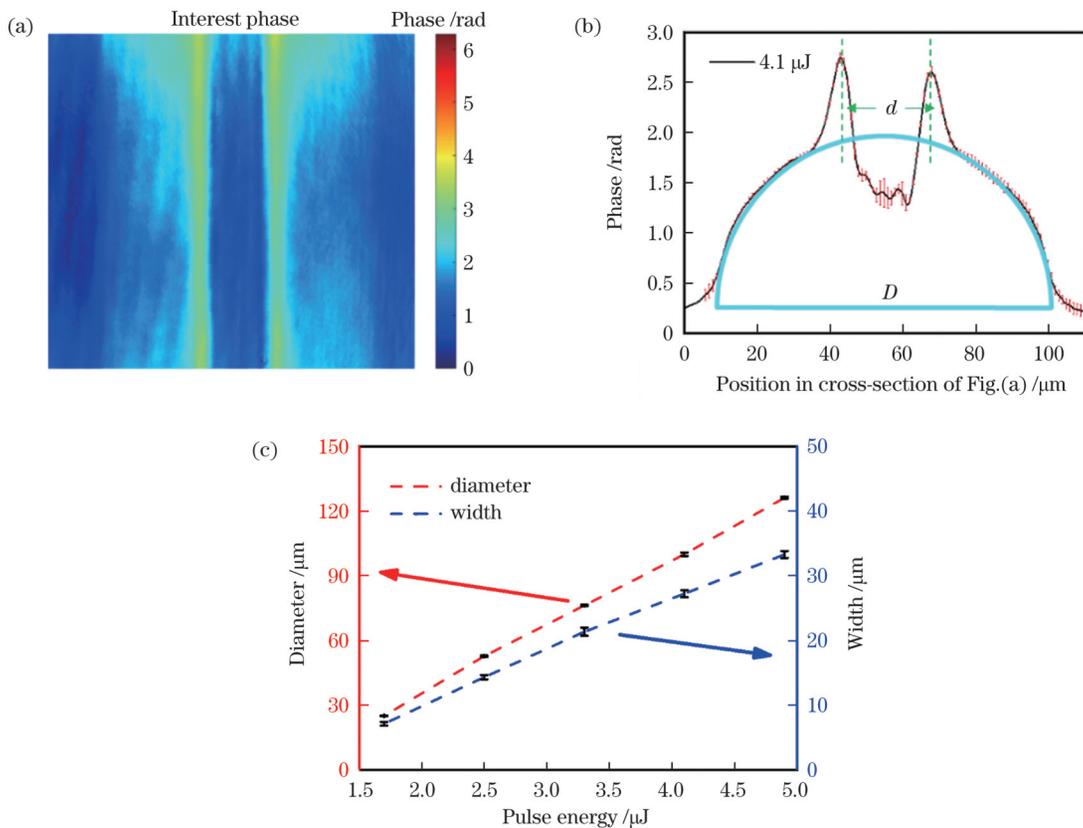


图 3 飞秒激光加工的钙钠玻璃内部的定量相位成像分析。(a)  $4.1\ \mu\text{J}$  单脉冲能量加工空腔的定量相位图像; (b)  $4.1\ \mu\text{J}$  脉冲能量加工空腔横截面处的相位平均曲线; (c) 半圆形折射率改性区域直径与空腔宽度随脉冲能量的变化

Fig. 3 Quantitative phase imaging analysis of the interior of calcium-sodium glass processed by femtosecond laser. (a) Quantitative phase image of the processed cavity with the single pulse energy of  $4.1\ \mu\text{J}$ ; (b) phase average curve of the cross-section of the processed cavity with the single pulse energy of  $4.1\ \mu\text{J}$ ; (c) diameter of the semicircle refractive-index modified region and the cavity width change with the pulse energy

受限于实验所用钙钠玻璃样品的尺寸限制, 实验中只能从俯视加工面的角度进行二维分析, 无法从三维角度分析加工区域的相位变化。为了进一步对加工结果

进行全面分析, 采用四面抛光的玻璃立方体进行实验, 使观测面变为俯视面和侧视面, 通过增加侧视角度的相位测量和分析来探索加工区域的物理模型及特征。

图 4 是玻璃立方体的飞秒激光加工示意图。由于实验材料的制备问题,选取了与钙钠玻璃性质相近的 K9 玻璃立方体作为实验材料。K9 玻璃是一种常用的光学和微系统材料,属硼硅酸盐玻璃,其中硼的质量分数为 10%,常作为原料用于透明光学器件的制造。依照图 4(a)所示的加工方式进行加工,然后使用定量相位成像系统分别获取俯视图( $z$ 轴方向)和侧视图( $y$ 轴方向)。图 4(b)是四面抛光的 K9 玻璃立方体的实物图。在实验中,为了避免立方体厚度对定量相位成像效果的影响,每一组目标样品的加工都是在相同的加工功率和光斑聚焦深度下完成的,同时加工深度处于均匀玻璃立方体内部较浅的位置处,其与玻璃表面的距离小于显微物镜的工作距离。所加工

空腔的尺寸较小,其相位值也较小(均小于  $2\pi$ ),可以保证对所加工区域进行精确的定量相位成像。如图 4(c)~(d)所示,在放大倍数为 20 倍的显微镜图片中可以清晰地看到在 K9 玻璃立方体中加工空腔后,空腔中心两侧有一层改性区域,改性区域包围着空腔向下延伸。图 4(c)为不同脉冲能量下加工的空腔在显微镜下的俯视图,从俯视图中可以看到加工两侧呈现为一种对称结构,使用明场显微镜观测到的形貌特征与使用定量相位成像系统测得的钙钠玻璃样品中空腔的相位特征一致。图 4(d)所示的侧视图区别于图 4(c)所示的俯视图,沿着入射光的方向,只能看到一个颜色较深的区域,其反映了所加工的空腔的物理尺寸。

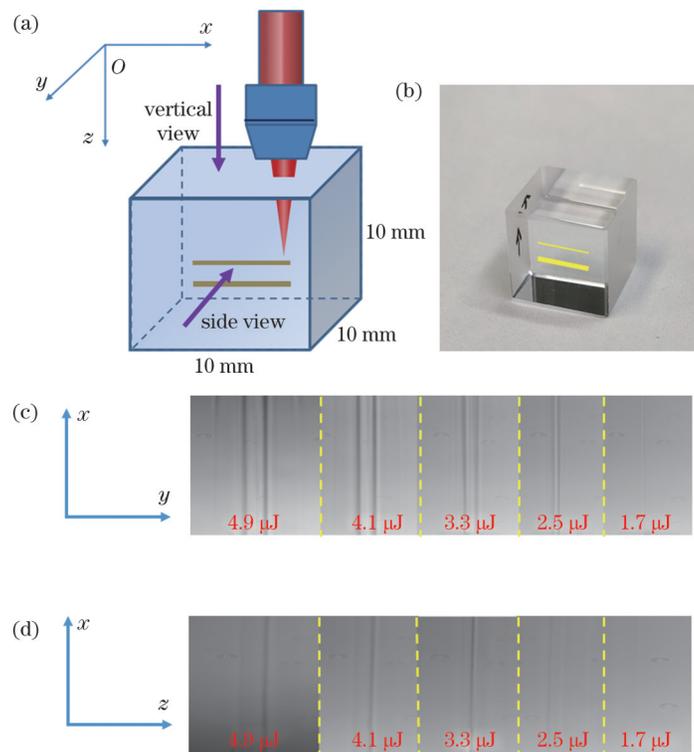


图 4 飞秒激光加工 K9 玻璃立方体示意图及结果分析。(a) K9 玻璃立方体加工示意图;(b) 四面抛光的 K9 玻璃立方体的实物图;(c) 不同脉冲能量下加工的空腔在显微镜下的俯视图;(d) 不同脉冲能量下加工的空腔在显微镜下的侧视图

Fig. 4 Schematic of femtosecond laser processing K9 glass cube; (b) a photo of the four-sided polished K9 glass cube; (c) top-view of the cavity processed at different pulse energies captured by a microscope; (d) side-view of the cavity processed at different pulses of energies captured by a microscope

使用定量相位成像系统对  $4.9 \mu\text{J}$  单脉冲能量下加工的空腔进行分析,从图 5 所示的相位图中可以直观地发现俯视方向出现了类似钙钠玻璃中呈现的半圆形折射率变化区域,在加工处的两侧出现了相位陡升区域。从侧视空腔的角度可以看到一个沿激光入射方向延伸的纵深区域,此区域的相位随着深度的增加趋近于未加工处的相位值。对所加工的空腔的相位进行分析可以得到空腔的直径为  $8.09 \mu\text{m}$ ,纵深区域的深度为  $127.57 \mu\text{m}$ ,此纵深区域是在加工过程中产生的热力和机械波叠加造成的局部区域内光学性质改变区。

本文首次通过定量相位成像方法验证了有掺杂玻璃内部的超快激光加工区域的性质变化和形貌特征,通过对比所加工区域的横向和纵向定量相位成像,可以直观定量地还原出空腔加工区域的物理模型。

## 2.2 飞秒激光在熔融石英内部的加工

为了探究无掺杂玻璃材料内部空腔的加工效果,进一步对熔融石英进行了相同的加工,并使用定量相位成像系统进行了定量分析。

图 6 是飞秒激光(单脉冲能量  $4.9 \mu\text{J}$ )在熔融石英内部加工的空腔的相位及明场显微镜图像,其中图 6(a)

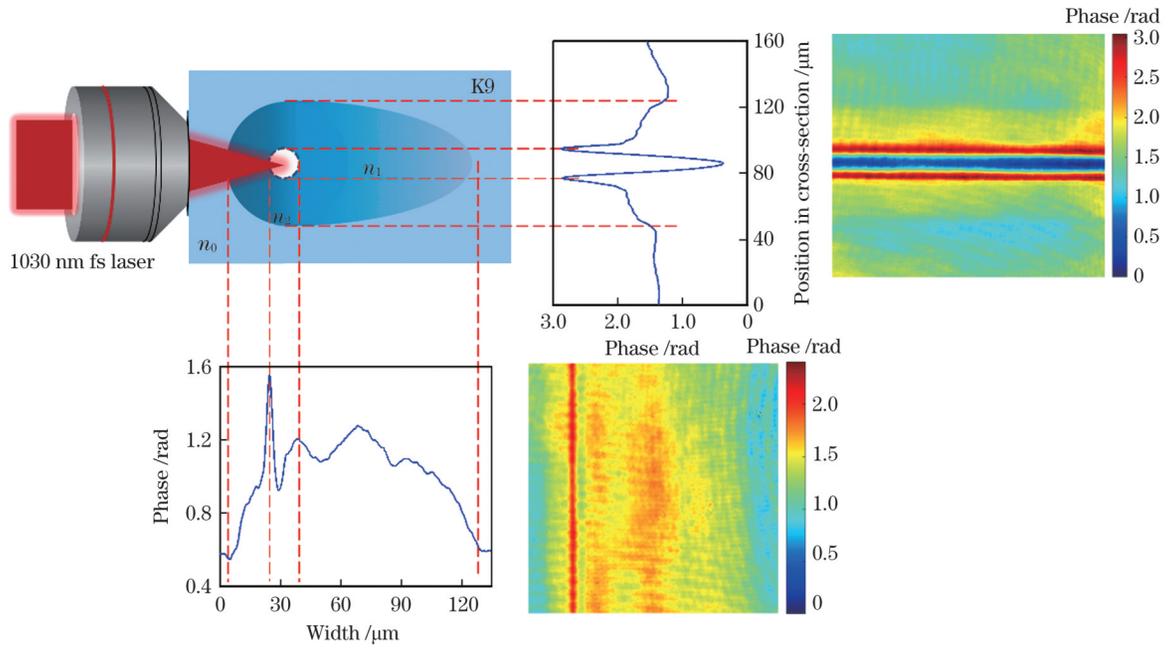


图 5 飞秒激光器在 K9 玻璃立方体中加工时的物理模型

Fig. 5 Physical model of femtosecond laser processing in K9 glass cube

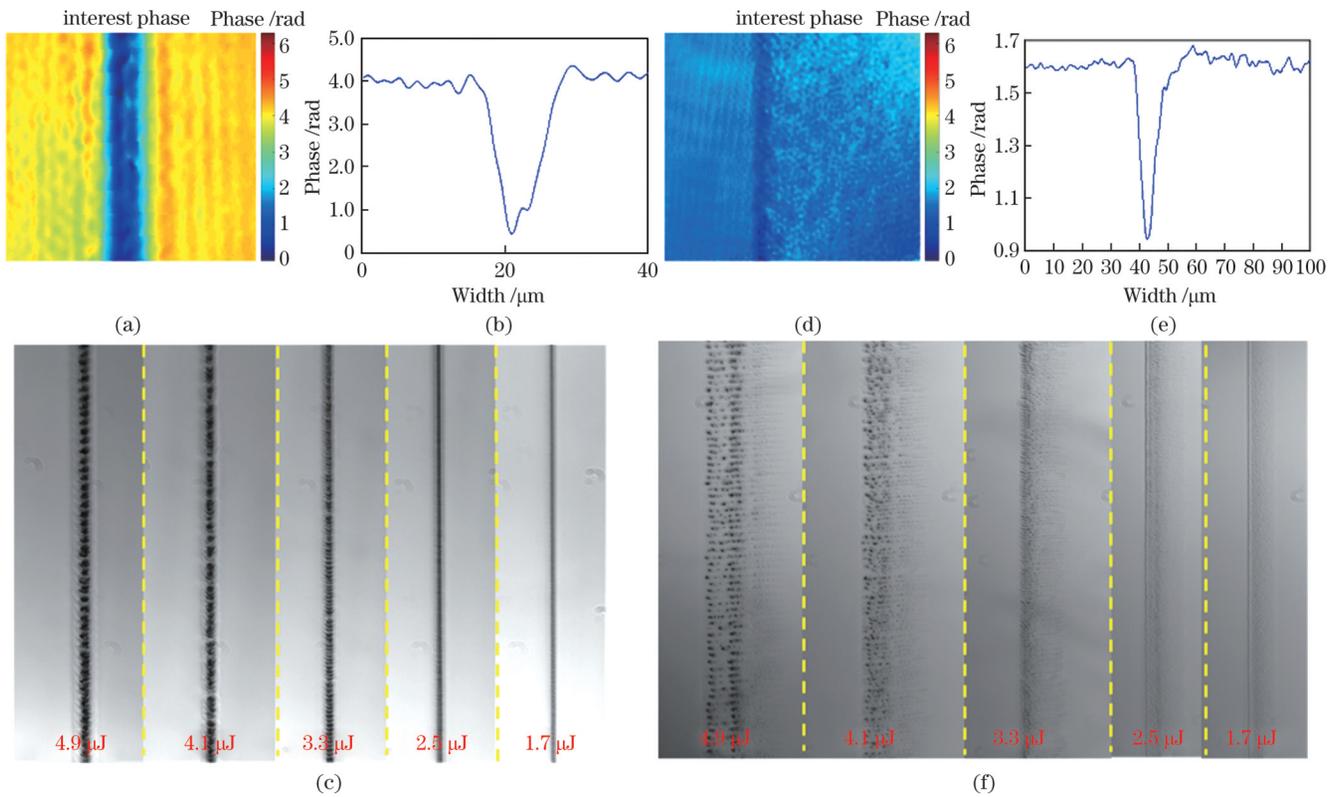


图 6 飞秒激光在熔融石英内部加工空腔的成像结果。(a)~(c)飞秒激光加工后,石英立方体内部俯视方向的相位图、相位曲线和明场显微镜图;(d)~(f)飞秒激光加工后,石英立方体内部侧视方向的相位图、相位曲线和明场显微镜图

Fig. 6 Imaging of cavity processed by femtosecond laser in fused quartz. (a)~(c) Phase diagram, phase curve, and bright-field microscopy image of quartz cube interior in overlooking direction after femtosecond laser machining; (d)~(f) phase diagram, phase curve, and bright-field microscopy image of quartz cube interior in side-view direction after femtosecond laser machining

为石英立方体内部加工后俯视方向的相位图,从图中可以看到加工区域中心呈现低相位,加工区域两侧呈现高相位,区别于有掺杂玻璃内部加工空腔的相位图。飞秒激光加工后,熔融石英内部没有出现半圆形改性

区域,由此推测改性区域的产生与透明介质材料内部的掺杂有直接关系。依照图 6(b)所示相位曲线可以计算得出在单脉冲能量为  $4.9 \mu\text{J}$  时,加工的空腔在俯视方向的尺寸(即空腔的直径)为  $13.11 \mu\text{m}$ ,加工位置

的相位相比未加工区域下降约 3.5 rad。图 6(c)是空腔在俯视方向的明场显微镜图,从图中可以看到加工区域呈现一种链状结构,并未出现中间空两侧呈管状及带状的对称结构。图 6(d)是飞秒激光在石英立方体内部加工后侧视方向的相位图,可以看到加工区域的相位先下降后又迅速升高,最终略高于未加工区域。相位下降区域的宽度即为所加工空腔的尺寸。依照图 6(e)中的相位曲线可以计算得到单脉冲能量为 4.9  $\mu\text{J}$  时加工的空腔在侧视方向的尺寸(即纵深)为 154.79  $\mu\text{m}$ 。图 6(f)是侧视方向的明场显微镜图,从图中可以看到在熔融石英中加工时也会有纵深的延伸现象<sup>[27-28]</sup>,并且延伸范围呈现为一种显著的“珍珠链”结构<sup>[29-30]</sup>。这是由于飞秒激光的焦点处在极短的时间内就可具有极高的峰值功率密度,使得熔融石英内部的飞秒激光作用区域产生了显著的自聚焦成丝效应。因此,折射率急剧变化的区域不是局限于焦点附近,而是随着自聚焦成丝从加工处沿着激光的波矢方向向下延伸,且在加工区域两侧的改革区域不明显。

### 3 结 论

利用飞秒激光分别对有掺杂玻璃(钙钠玻璃和 K9 玻璃)和无掺杂玻璃(熔融石英玻璃)内部进行了空腔的加工,并通过定量相位成像技术对所加工的空腔结构进行多维度表征。结果显示:有掺杂玻璃在加工的俯视方向会出现管状和带状的对称区域,在此区域内相位呈现一种半圆形的变化趋势,相位在空腔中心下降,在边缘骤升;加工区域在侧视方向出现延伸,且相位先升高后减小。在无掺杂玻璃中,俯视方向加工区域的相位下降,两侧相位升高,但两侧并无半圆形改性区域,加工的空腔边缘处也没有骤升的相位变化;加工区域在侧视方向上也有延伸,但相位会在加工区域下降后迅速升高,延伸区域的相位略高于未加工区域。

定量相位成像技术是一种重要的光学微观表征手段,在超快激光加工效果的检测中具有很重要的作用。相较于原子力显微镜,定量相位成像技术可以探测到玻璃材料的内部,还原其内部及改性区域的形貌,对目标样品进行精确表征。通过对玻璃内部加工区域的多角度分析,本文还原了钙钠玻璃和 K9 玻璃内部加工位置及其周围改性区域的形貌变化,并用三维视图进行了描述。结果表明:不同掺杂的玻璃材料在相同能量下加工时产生的改性区域范围有着很显著的区别;在无掺杂的熔融石英中,随着飞秒激光的加工,出现了“珍珠链”结构,加工位置周围的透明改性区域不明显。导致这一现象的原因与玻璃中掺杂的物质改变了介质材料本身的折射率有关。因此,定量相位成像技术有望在激光加工检测领域发挥重要作用。

### 参 考 文 献

- [1] Perevoznik D, Tajalli A, Zuber D, et al. Writing 3D waveguides with femtosecond pulses in polymers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(13): 4390-4394.
- [2] Liao Y, Ni J L, Qiao L L, et al. High-fidelity visualization of formation of volume nanogratings in porous glass by femtosecond laser irradiation[J]. *Optica*, 2015, 2(4): 329-334.
- [3] 吴雪峰, 梅三林. 飞秒激光加工机理及仿真研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1900005.
- [4] Wu X F, Mei S L. Research progress in femtosecond laser machining mechanism and simulation analysis[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1900005.
- [5] Sun M Y, Eppelt U, Schulz W, et al. Role of thermal ionization in internal modification of bulk borosilicate glass with picosecond laser pulses at high repetition rates[J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(10): 1716-1726.
- [6] Sakakura M, Lei Y H, Wang L, et al. Ultralow-loss geometric phase and polarization shaping by ultrafast laser writing in silica glass[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 1-10.
- [7] Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast lasers: reliable tools for advanced materials processing[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(4): e149.
- [8] 姜玺阳, 王飞飞, 周伟, 等. 飞秒激光与材料相互作用中的超快动力学[J]. *中国激光*, 2022, 49(22): 2200001.
- [9] Jiang X Y, Wang F F, Zhou W, et al. Ultrafast dynamics of femtosecond laser interactions with materials[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(22): 2200001.
- [10] Wang X D, Yu H B, Li P W, et al. Femtosecond laser-based processing methods and their applications in optical device manufacturing: a review[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106687.
- [11] 李佳群, 闫剑锋, 李欣, 等. 透明介质材料的超快激光微纳加工研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202019.
- [12] Li J Q, Yan J F, Li X, et al. Research advancement on ultrafast laser microprocessing of transparent dielectrics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202019.
- [13] 汤李纓, 高栋良, 向光. BaO、Li<sub>2</sub>O 对钠钙硅玻璃热膨胀系数和化学稳定性的影响[J]. *材料导报*, 2013, 27(S1): 195-197.
- [14] Tang L Y, Gao D L, Xiang G. Effect of BaO and Li<sub>2</sub>O content on the thermal expansion coefficient and chemical stability of Na<sub>2</sub>O-CaO-SiO<sub>2</sub> glass[J]. *Materials Review*, 2013, 27(S1): 195-197.
- [15] Bhardwaj V R, Simova E, Corkum P B, et al. Femtosecond laser-induced refractive index modification in multicomponent glasses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(8): 083102.
- [16] 付莉娜, 杨静雯, 李雁玲, 等. 二值条纹离焦投影技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(14): 1415011.
- [17] Fu L N, Yang J W, Li Y L, et al. Binary fringe defocused projection technology: a review[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(14): 1415011.
- [18] 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(8): 0800001.
- [19] Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0800001.
- [20] 季颖, 龚凌冉, 傅爽, 等. 基于卷积神经网络的相位体自动识别方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(6): 0617026.
- [21] Ji Y, Gong L R, Fu S, et al. Automatic phase recognition method based on convolutional neural network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(6): 0617026.
- [22] 季颖, 韦鑫宇, 张明明, 等. 相位边缘检测下形态特征快速提取的实验采样策略[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(6): 0617030.
- [23] Ji Y, Wei X Y, Zhang M M, et al. Experimental sampling strategy for rapid extraction of morphological features based on phase edge detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(6): 0617030.
- [24] 杨泽文, 张璐, 吕宁, 等. 生物折射率三维无标记定量成像研究进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(5): 0507201.
- [25] Yang Z W, Zhang L, Lü N, et al. Progress of three-dimensional, label-free quantitative imaging of refractive index in biological

[1] Perevoznik D, Tajalli A, Zuber D, et al. Writing 3D waveguides

- samples[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(5): 0507201.
- [17] Shen Z A, Dogariu A. Meaning of phase in subwavelength elastic scattering[J]. Optica, 2019, 6(4): 455-459.
- [18] Shen Z A, Cui S W, Dogariu A. Polarization-encoded field measurement in subwavelength scattering[J]. Optics Letters, 2019, 44(14): 3446-3449.
- [19] 戴思清, 豆嘉真, 张继巍, 等. 基于数字全息术的近场成像与应用[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111008.  
Dai S Q, Dou J Z, Zhang J W, et al. Digital holography based near-field imaging and its application[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111008.
- [20] Shu Y, Sun J, Lü J M, et al. Adaptive optical quantitative phase imaging based on annular illumination Fourier ptychographic microscopy[J]. Photonix, 2022, 3(1): 1-15.
- [21] Wang Y, Zhu L D, Zhou H X, et al. Quantitative phase imaging using spectral domain phase microscopy without phase wrapping ambiguity[J]. Optics Letters, 2019, 44(1): 151-154.
- [22] Li Y F, Fanous M J, Kilian K A, et al. Quantitative phase imaging reveals matrix stiffness-dependent growth and migration of cancer cells[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-8.
- [23] Hu C F, Popescu G. Quantitative phase imaging (QPI) in neuroscience[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(1): 6801309.
- [24] 张润南, 蔡泽伟, 孙佳嵩, 等. 光场相干测量及其在计算成像中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811003.  
Zhang R N, Cai Z W, Sun J S, et al. Optical-field coherence measurement and its applications in computational imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811003.
- [25] 满天龙, 王玉红, 菅孟静, 等. 面向生物样品三维成像的光干涉显微技术研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(15): 1507202.  
Man T L, Wan Y H, Jian M J, et al. Research progress in optical interference microscopy toward three-dimensional imaging of biological samples[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(15): 1507202.
- [26] Cui S W, Gao S, Li C H, et al. Quantitative phase imaging based on polarization encoding[J]. Optics Express, 2022, 30(24): 43622-43632.
- [27] 孙劭伟, 齐乃杰, 孔艳, 等. 熔石英玻璃激光损伤的三维应力场研究[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0101001.  
Sun S W, Qi N J, Kong Y, et al. Three-dimensional stress fields of laser damaged fused silica[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0101001.
- [28] Hnatovsky C, Simova E, Rajeev P P, et al. Applications of femtosecond laser-induced self-assembled nanocracks in fused silica glass[C]//Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides 2007, September 2-6, 2007, Québec City, Canada. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2007: BTuD1.
- [29] 周强, 王俊波, 邱荣, 等. 纳秒激光诱导熔石英玻璃损伤的超快诊断[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0303003.  
Zhou Q, Wang J B, Qiu R, et al. Ultra-fast diagnosis of nanosecond laser induced fused silica damage[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0303003.
- [30] Ohmura E. Analyses of self-focusing phenomenon and temperature rise in fused silica by ultrashort pulse laser irradiation[J]. Procedia CIRP, 2013, 5: 7-12.

## Application of Quantitative Phase Imaging in Ultrafast Laser Processing Inspection

Li Changheng<sup>1,2</sup>, Cui Shengwei<sup>1,2\*</sup>, Yao X. Steve<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Photonics Information Innovation Center, College of Physics and Technology, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China;

<sup>2</sup>Hebei Provincial Center for Optical Sensing Innovations, Baoding 071002, Hebei, China

### Abstract

**Objective** Laser technology has become increasingly widespread in various research fields in recent years. Compared with continuous laser processing, femtosecond laser processing can improve or even eliminate the thermal effects caused by laser reactions, while being highly designable and controllable because of the wide range of materials that can be processed. Currently, the atomic force microscopy is widely used for the inspections of the morphology of femtosecond laser etching processes. This method can achieve nanoscale precision measurements of the sample morphology; however, the inspection process is slow and expensive and can only detect the physical dimensions of surface etching, which is a significant constraint when studying the morphology of transparent materials after femtosecond laser internal processing. A bright-field microscope can only qualitatively measure the edges of the process without information on the refractive index. In contrast, quantitative phase imaging (QPI) is an imaging method that can measure the phase information of transparent samples by allowing light beams to pass through the processed area while quantitatively detecting the optical properties around the processed area. Due to its non-contact nature, high sensitivity, and wide field of view, QPI has been used extensively in industrial inspection and biomedicine. However, to the best of our knowledge, its application in femtosecond-laser processing has not yet been reported. Therefore, this study proposes performing QPI measurements on femtosecond laser-processed glass samples. The results demonstrate the potential of this method in detecting the sizes and refractive indices of machined cavities inside glass cubes, as well as verifying the effects of different glass dopants with different femtosecond laser pulse energies.

**Methods** In this experiment, a femtosecond laser was focused on a glass sample, creating linear cavities inside the glass with the aid of high pulse energy. Initially, the processed sample inside the calcium-sodium glass was characterized using a bright-field microscope and QPI system to determine the size of the machined cavity. During this process, the changes in the modified region around the cavity can be quantitatively measured using a QPI system. To analyze the three-dimensional physical characteristics of the

laser processing area from a side view, a four-sided polished K9 glass cube was employed. Finally, to further investigate the effects of cavity processing on undoped glass materials, the same process was performed on fused silica and analyzed quantitatively using the QPI system.

**Results and Discussions** Femtosecond lasers with different pulse energies were used to process cavities inside doped (calcium-sodium glass and K9 glass) and undoped (fused silica) glass cubes, and the cavity structures were characterized in three dimensions using QPI. After femtosecond laser processing, the doped glass exhibits a symmetrical area of tubes and bands in the top-view direction. In this region, the phase undergoes a semicircular change, with the phase falling in the center and rising at the edges of the cavity (Fig. 3). In the side-viewing direction, there is an extension, and the phase first increases and then decreases. By analyzing the processing area inside the glass from various angles, we restore the morphological changes in the modified area around the processing location inside the calcium-sodium and K9 glasses and describe them in three dimensions (Fig. 5). For undoped glass, the phase decreases in the processed area in the top-view direction and increases on both sides. However, there is no semicircular modified area or abrupt phase change at the edge of the processed cavity. In the side-view direction, the phase drops and rises rapidly in the machined area, whereas the average phase is slightly higher than that in the unmachined area (Fig. 6).

**Conclusions** QPI is an important technique for analyzing optical-microscopic characteristics and has the potential to be a valuable tool in ultrafast laser processing. Unlike atomic force microscopy, QPI can probe the interior of transparent materials and recover their internal morphology using quantitative phase information. Through the three-dimensional analysis of the machined areas inside the glass, it is possible to restore and depict the morphological changes around the modified areas of calcium-sodium and K9 glasses. The results indicate a significant difference in the range of the modified areas produced by different doped glass materials, when processed at the same energy. When the undoped fused silica is subjected to femtosecond laser processing, a “pearl chain” structure appears and the semicircular modification of the refractive index around the processed position is not readily apparent. This phenomenon is related to a change in the refractive index of the glass itself caused by the doped materials. In conclusion, QPI holds promise for playing an important role in the field of laser processing inspection.

**Key words** laser technique; quantitative phase imaging; femtosecond laser; laser processing; optical modification; glass doping