

采用显微荧光法研究掺钕磷酸盐激光玻璃的 亚表面缺陷

王 威^{1,2} 张 磊¹ 冯素雅¹ 陈 伟^{1*} 胡丽丽¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光单元研发中心, 上海 201800)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对具有多波段强吸收和发光特点的 N31 和 N41 型掺钕磷酸盐激光玻璃, 选取罗丹明 6G(R6G)作为荧光标记物, 它的激发和发光分别避开了钕离子吸收和发光, 在宽场显微镜下实现了对磷酸盐玻璃亚表面缺陷(SSD)的高灵敏度二维观测。与光学显微观测的结果对比, 证明所观测到的缺陷属于亚表面缺陷。根据 R6G 显微荧光观测的结果, 分析了亚表面裂纹在抛光过程中的演变情况。结果表明在磷酸盐玻璃中比较难去除的亚表面缺陷是处于缺陷层中位置较深的 Median 型裂纹末端的月牙形缺陷。它们可能对入射光场具有较强的调制, 引发表面激光损伤的可能性相对较大。

关键词 光学制造; 掺钕磷酸盐激光玻璃; 荧光显微; 亚表面缺陷

中图分类号 TN244; TQ171.65 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0906001

Using Fluorescent Microscopy Method to Study Subsurface Defects in Nd-Doped Phosphate Laser Glasses

Wang Wei^{1,2} Zhang Lei¹ Feng Suyu¹ Chen Wei¹ Hu Lili¹

(¹ *Research and Development Center for High Power Laser Components, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*
² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract For N31 and N41 Nd-doped phosphate glasses with strong multiband absorption and emission, Rhodamine 6G (R6G) is chosen as the fluorescence label to realize high resolution two dimensional observation of subsurface defects (SSD) in these glasses under wide field microscopy, as the excitation and emission bands of R6G are different from the emission and excitation bands of Nd-doped phosphate laser glass respectively. It is demonstrated that the detected defects are classified as SSD by comparing the R6G fluorescence microscopy images and related optical microscopy images. The transformation of SSD during polishing process is analyzed according to related R6G fluorescence microscopy detection results. The results show that the crescent cracks which are near the tail end of deep Median type cracks are comparatively hard to be removed in the Nd-doped phosphate glass. These crescent cracks may induce strong modification to the incident optical field, and relatively increase the probability of laser induced surface damage.

Key words optical fabrication; Nd-doped phosphate laser glass; fluorescent microscopy; subsurface defects

OCIS codes 220.4610; 160.3380; 180.2520

1 引 言

掺钕磷酸盐激光玻璃被广泛应用于中国神光^[1]、美国国家点火装置(NIF)^[2]和法国兆焦耳激

光项目(LMJ)^[3]等高功率激光系统, 当激光通量提高到一定程度, 将面临表面和亚表面缺陷(SSD)引发表面激光损伤的问题^[4]。另外, 对于今后数千片

收稿日期: 2014-03-17; 收到修改稿日期: 2014-03-26

基金项目: 国家钕玻璃专项(1329031A00)

作者简介: 王 威(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学及材料表面缺陷等方面的研究。

E-mail: lplacel23@gmail.com

导师简介: 陈 伟(1968—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光玻璃材料、光谱、缺陷、激光性质及其相互作用等方面的研究。E-mail: weichen@sio.ac.cn(通信联系人)

同时工作的大口径激光钹玻璃,由于表面和亚表面缺陷,使用寿命将受到严重影响。目前,高质量光学元件的加工,已经进入了超精密抛光控制阶段^[5]。因此,在磷酸盐钹玻璃加工过程中,研究其亚表面缺陷的控制具有非常重要的意义。

目前常用的亚表面缺陷检测方法主要分为两类。1) 为直接将 SSD 暴露出来观测的破坏性检测方法,例如坑击法、锥度/楔形抛光^[6-9]、磁流变抛光^[10-11],包括迄今仍然在广泛采用的传统湿化学侵蚀^[12-14]等方法,对于表面和亚表面缺陷的观测和研究,特别是对于激光表面损伤阈值与材料表面性质之间关系的研究得到了许多有意义的研究结果。但是此类方法检测周期长,对材料具有破坏性。2) 为无损检测方法,包括激光调制光散射技术^[15]、光干涉技术^[16]、全内反射技术^[17]、光学相干层析技术^[18]、激光超声技术^[19]、磁光显微成像技术^[20]、共焦显微成像技术^[21]等。相对于有损检测,无损检测技术的灵敏度较低^[22],对亚表面缺陷的检测是有困难的^[23]。

共焦荧光显微技术^[22-23]是一种借助于亚表面缺陷直接相关联的荧光增强技术,文献^[22]检测了石英玻璃中余留的加工用油基冷却液在 405 nm 或 458 nm 激光激发下位于 435~661 nm 区间的荧光;文献^[23]则是在康宁 0215 玻璃的加工中加入 7.8 nm 的硒化镉量子点,检测 540 nm 激光激发下位于 553±10 nm 的荧光。但是对于掺钹磷酸盐激光玻璃难以采用上述方式。原因是在钹离子激光材料中,大多数可见波长(300~900 nm)均可以激发稀土钹离子发射很强的荧光,这将掩盖掉亚表面缺陷给出的缺陷信息,无法高灵敏度地检测出亚表面缺陷。

罗丹明类衍生物作为各种荧光探针在有机生物类材料的检测中有着重要应用^[24]。本文以罗丹明 6G(R6G)作为荧光标记物,同时采用能够原位进行荧光光谱检测的宽场荧光显微系统,测定并研究了掺钹磷酸盐激光玻璃中的亚表面缺陷的特征及其随抛光过程的演变情况。

2 实 验

掺钹磷酸盐玻璃的样品为本实验室所研制的 N31 和 N41 型激光钹玻璃。切割后的样品尺寸为 20 mm×20 mm×5 mm。所有用于本文观测的样品均经过足够长时间的精密抛光,以去除前期研磨过程残余的亚表面缺陷。

实验中所采用的 R6G 购于阿拉丁试剂有限公

司,纯度为 95%。将 R6G 粉末按照 1×10^{-2} mol/L 物质的量体积比溶于无水乙醇中。按照所设定的不同比例,将含有 R6G 的乙醇溶液,二次溶解到能够防止 R6G 团聚而不会发生严重荧光淬灭^[25]的醇类水溶液中待用。

分别采用传统散粒磨料研磨工艺和浸液抛光工艺对磷酸盐玻璃样品表面进行研磨和抛光处理。研磨工艺使用研磨料为 125 μm 粒径的 SiC 颗粒,研磨剂的配比为 10g 磨料配 500 mL 的含 R6G 醇类水溶液。研磨盘为直径 280 mm 带有垂直凹槽的铸铁盘,其主轴转速控制在 30 rpm。

采用的抛光粉为 CEROXTM OPALINE CE460 型二氧化铈粉料,平均粒径为 0.5~1 μm。配液为纯水。验证实验时将 5g 二氧化铈粉料添加于含 R6G 醇类水溶液中。抛光装置为沈阳晶科自动化设备有限公司制造的 UNIPOL-830 型抛光机,其主轴转速控制在 110 rpm。进行 R6G 显微荧光检测前,所有样品均先置入乙醇中,采用超声波清洗机清洗 5 min。然后再使用蘸有异丙基乙醇的拭镜棉片擦拭样品表面。

R6G 显微荧光观测系统由 Nikon Ti-U 型倒置光学-荧光显微镜和 QM-40 型荧光光谱仪组成。两者均采用连续氙灯激发光源对样品进行激发。经过双光栅单色仪分光后的氙灯激发光,可以分别激发位于显微镜样品工作台上和光谱仪样品室中的待测样品。位于显微镜工作台上的样品中发出的荧光信号可以采用两种方式检测。一是将荧光信号经过显微镜物镜、二向色镜、折反棱镜,传输到 DU-897 型电子倍增型电荷耦合元件(CCD),得到二维 R6G 显微荧光图像。二是将荧光信号通过光纤传输到 QM-40 型荧光光谱仪,得到 R6G 荧光强度与波长的关系。这两种检测方式均能够对工作台上样品进行原位检测,因此能够判断进入显微成像的荧光成分属于何种性质的光信号,从而判断出显微图像是否为缺陷结构的反映。显微实验观测所用目镜放大倍率为 10×,带有屈光度调节。无论是光学显微模式,还是荧光显微模式,均可以采用 10×(数值孔径为 0.3,工作距离为 16 mm)和 60×(数值孔径为 0.7,工作距离为 2.6 mm)萤石平场显微物镜。

3 实验结果和讨论

在暗室条件下使用 480 nm 单色光激发显微镜工作台上的钹玻璃,通过 X-Y 双向光阑,选取对应于样品中荧光部位的光信号,使用光谱仪测定相应

荧光光谱,得到的荧光光谱与 R6G 荧光溶液直接测定到的光谱完全相同,均为 525~625 nm、峰值波长为 550 nm 的宽峰,与文献[24]的报道相同。需要说明的是,显微镜工作台上的钕玻璃样品,测试前在乙醇中超声清洗 5 min,表面不会有 R6G 残留物。这说明从样品中得到的荧光信号应该来源于钕玻璃样品内部,但从谱线峰位来看,可以排除是钕离子发光。由于上述两条谱线在峰值、半峰全宽、谱形方面几乎完全一致,说明样品中所反映的光信号是 R6G 分子所发出的荧光。它的光谱强度相对较弱,是因为样品内部所含的 R6G 溶液很少。

为了验证样品中的荧光信号来源于样品内部的亚表面缺陷,进行了以下显微图像对比实验。采用含有 R6G 溶液的 125 μm 颗粒度 SiC 进行研磨,对于 N31 型钕玻璃抛光 50 min,对于 N41 型钕玻璃抛光 35 min。对于这两个样品分别进行了光学显微和

R6G 荧光显微观测,结果如图 1 所示。图 1(a)和(c)显示,在普通光学显微模式下,即仅仅在白光透射照明条件下,钕玻璃样品的表面观测到了部分缺陷,如图 1(a)很大的缺陷坑和图 1(c)小缺陷坑和很长的拖尾擦伤等。对于相同区域,切换至 R6G 显微荧光观测方式,即采用 480 nm 单色光照射钕玻璃样品的表面。图 1(b)和(d)显示,无论是 N31 型还是 N41 型钕玻璃,均在原来没有观测到缺陷存在迹象的区域,显示出了具有缺陷特征的荧光信号,而原来光学显微图显示出清晰的缺陷坑和长擦伤等缺陷,由于显微镜镜头调焦后对准亚表面缺陷进行荧光成像,有些细微结构不再清晰。由于在研磨过程中进入钕玻璃内部的 R6G,经过抛光和超声清洗仍能保留下来的,只能是位于亚表面缺陷中,这些在 R6G 显微荧光观测中新出现的痕迹,应当位于玻璃表层以下,反映的是钕玻璃样品中的亚表面缺陷的信息。

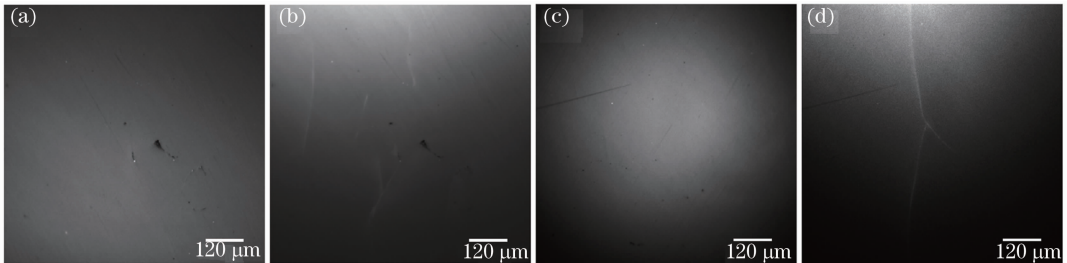


图 1 掺钕磷酸盐激光玻璃中亚表面缺陷的光学显微图和 R6G 荧光显微图的对比。(a) N31 玻璃的光学显微图; (b) N31 玻璃的 R6G 荧光显微图;(c) N41 玻璃的光学显微图;(d) N41 玻璃的 R6G 荧光显微图

Fig.1 Comparison between the optical microscopy and R6G fluorescent microscopy images of subsurface defects in Nd-doped phosphate laser glasses. (a) Optical microscopy image for N31 glass; (a) R6G fluorescent microscopy image for N31 glass; (c) optical microscopy image for N41 glass; (d) R6G fluorescent microscopy image for N41 glass

亚表面缺陷层大致位于 0.1~1 μm 厚的表面抛光层下^[26-27],由此可见,要检测到亚表面缺陷的前提条件就是要让这些缺陷的信息能够透过处于表面顶层的抛光层。如果不对样品表面进行锥度/楔形、磁流变抛光以及化学侵蚀等后续处理,光学显微相对较难发现和观测亚表面缺陷。而处于亚表面缺陷中的 R6G,在适合波长激发下所发出的荧光信号,能够透过抛光层,不再需要对样品表面进行物理或化学的后续处理而直接观测亚表面缺陷。即使是相对很弱的 R6G 荧光信号,也能够进入具有高灵敏度的电子倍增型 CCD 成像。

亚表面缺陷,包括各种裂纹、空洞等^[23],以及各种断裂、擦伤^[27]等。它的形成机理是在研磨等过程中形成的表面微裂纹,由于在抛光过程中没有被完全消除,从而被覆盖于抛光层下^[23,26-27]。所以随着

抛光过程的进行,不仅是对表面面形和粗糙度的精密加工,在一定程度上也是将抛光层下面的亚表面缺陷不断去除。

图 2 通过 R6G 显微荧光法,跟踪观测了一个 Median 类型的亚表面裂纹缺陷在抛光过程中的演变。对于固定的抛光工艺和参数,对于抛光时间较短而磨削量较大的抛光过程,磨削量基本上与抛光时间成正比。图 2(a)~(d)分别显示了经过 60,70,80,90 min 抛光后同一亚表面裂纹的长度。在 60~80 min 抛光时间内每经过 10 min 该裂纹长度仅缩短约 3 μm 。80~90 min 抛光时间内,裂纹长度却缩短约 18 μm 。按照 Median 裂纹的可能形状^[28],图 2 中的裂纹应该是开口向上的抛物线形状。如果该裂纹没有被抛光完全去除,最后残余在掺钕磷酸盐玻璃内部分的形状类似于月牙形。

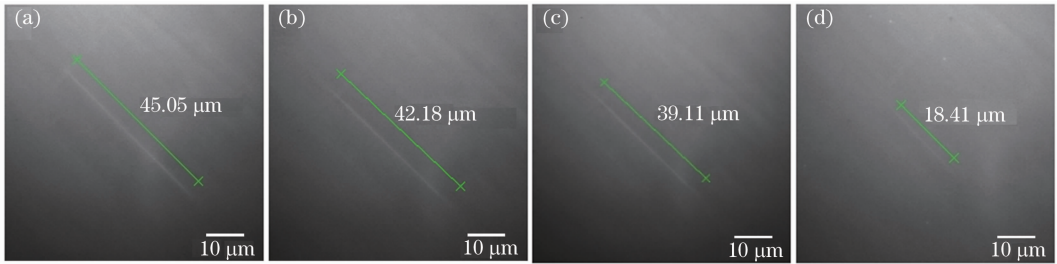


图 2 掺钕磷酸盐玻璃中亚表面缺陷的 R6G 荧光显微图。抛光时间为(a) 60 min;(b) 70 min;(c) 80 min;(d) 90 min

Fig.2 R6G fluorescent microscopy images of SSD in Nd-doped phosphate laser glass. Polishing time:

(a) 60 min; (b) 70 min; (c) 80 min; (d) 90 min

图 2 中长约数十微米的亚表面裂纹,应该是由锐形压头造成的^[28],而且在整个裂纹形成的瞬间,压头是静止的。对于图 1 中长约数百微米的亚表面裂纹,有可能是由滑动压头^[29]造成较深的 Median 类型的裂纹。尚不清楚是否如石英玻璃^[13]所表现的那样,在其两侧应当观测到横向或径向裂纹。可能是压头比较尖锐,也可能与掺钕磷酸盐玻璃的基

质性质石英玻璃不同有关。

图 3(a)和(b)观测了 250 μm 长的亚表面裂纹在抛光过程中的演变。发现图 3(a)中原本连续的长裂纹在经过 20 min 抛光后,变化为 5 个间隔不等的小裂纹。图 3(c)和(d)给出了抛光过程中该裂纹变化的模拟图像。图 3(d)显示这些残余在样品中的多个亚表面裂纹,形状上也类似于月牙形。

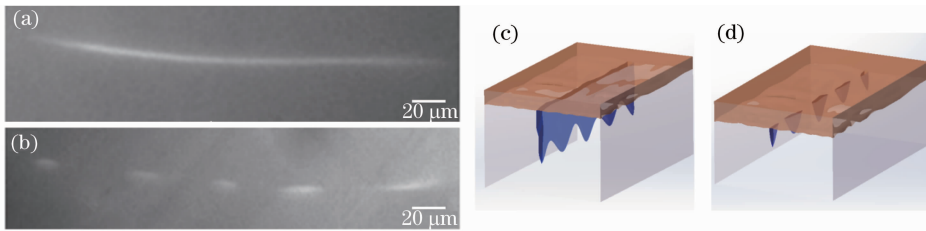


图 3 掺钕磷酸盐激光玻璃亚表面缺陷在抛光过程中的演变。(a) 抛光时间为 60 min;

(b) 抛光时间为 80 min; (c)、(d) 裂纹的模拟图像

Fig.3 Transformation of a subsurface defect in Nd-doped phosphate laser glass during polishing procedure.

(a) 60 min polishing; (b) 80 min polishing; (c), (d) simulation images of cracks

根据所观测得到的显微荧光缺陷,特别是它们在抛光过程中的演变情况,掺钕磷酸盐激光玻璃中可能有较多的没有被抛光完全去除的亚表面裂纹。这些残余的亚表面裂纹最后会演变成为如图 2 和图 3 所示的月牙形亚表面缺陷。为了比较这些尺寸较小的裂纹对于表面激光损伤的程度,采用时域有限

差分分析^[30],计算了磷酸盐玻璃表面以下深度约 3 μm、尺寸为 10 μm×2 μm×1 μm 的月牙形裂纹对于入射光场的可能调制。作为对比,同时计算了同样深度和尺寸的矩形裂纹。计算中将入射光场设定为 1。与矩形裂纹相比,月牙形裂纹总体上表现出对入射光场更高的调制度。当矩形裂纹位于前表

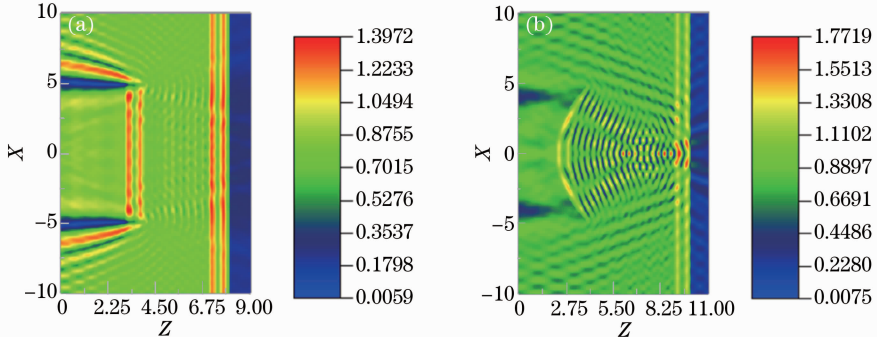


图 4 玻璃基质中矩形裂纹和月牙形裂纹对入射光场的调制。(a) 位于前表面的矩形裂纹;(b) 位于前表面的月牙形裂纹

Fig.4 Modification of incident optical field due to rectangular crack and crescent crack in the glass host.

(a) Rectangular crack near the front surface; (b) crescent crack near the front surface

面时,场增强因子约为 1.95~2.05;但是当月牙形裂纹位于前表面时,场增强因子约为 3.04~3.53。计算结果表明,R6G 显微荧光所发现的可能存在于掺钕磷酸盐中的亚表面月牙形裂纹,将造成较大入射光场强度高出许多的强光场集中区。相对于规则形状的亚表面缺陷,场增强因子增强了 55%~75%。这些在抛光过程中形成的微小不规则月牙形裂纹,很有可能相对增大了掺钕磷酸盐激光玻璃表面发生损伤的几率。

4 结 论

以适合于钕离子多波段吸收和发光特点的罗丹明 R6G 为荧光探针,结合宽场显微技术和高灵敏度电子倍增型 CCD,观测和分析了 N31 和 N41 型掺钕磷酸盐激光玻璃中的亚表面缺陷。结合 R6G 显微荧光和荧光光谱,对经过含有 R6G 和 SiC 溶液研磨的掺钕磷酸盐激光玻璃样品进行原位荧光的成像和光谱检测,验证所观测到缺陷信息来源于抛光层下面的亚表面层。观测和分析了亚表面缺陷随抛光过程的演变,可能在掺钕磷酸盐激光玻璃中较多残余的是月牙形裂纹。计算结果表明这些在抛光过程中形成的月牙形亚表面裂纹,虽然尺寸很小,但相对于规则形状的裂纹,更大程度地增大了磷酸盐玻璃表面发生激光损伤的几率。

参 考 文 献

- 1 H Peng, X F Zhang, X Wei, *et al.*. Design of 60-kJ SG-III laser facility and related technology development[C]. SPIE, 2001, 4424: 98-103.
- 2 E Moses, G Miller, C Wuest. The national ignition facility: Enabling fusion ignition for the 21st century[J]. Nuclear Fusion, 2004, 44(2): 228-238.
- 3 M L Andre. Status of the LMJ project[C]. SPIE, 1997, 3047: 38-42.
- 4 H Liu, J Huang, F Wang, *et al.*. Subsurface defects of fused silica optics and laser induced damage at 351 nm [J]. Opt Express, 2013, 21(10): 12204-12217.
- 5 B Mullany, M Mainuddin. The influence of process vibrations on precision polishing metrics [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61(1): 555-558.
- 6 Y Zhou, P D Funkenbusch, D J Quesnel, *et al.*. Effect of etching and imaging mode on the measurement of subsurface damage in microground optical glasses [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1994, 77(12): 3277-3280.
- 7 X Tonnellier, P Morantz, P Shore, *et al.*. Subsurface damage in precision ground ULE R and Zerodur R surfaces [J]. Opt Express, 2007, 15(19): 12197-12205.
- 8 X Tonnellier, P Shore, X Luo, *et al.*. Wheel wear and surface/subsurface qualities when precision grinding optical materials[C]. SPIE, 2006, 6273: 627308.
- 9 X Sun, D Stephenson, O Ohnishi, *et al.*. An investigation into parallel and cross grinding of BK7 glass [J]. Precision

- Engineering, 2006, 30(2): 145-153.
- 10 S Li, Z Wang, Y Wu. Relationship between subsurface damage and surface roughness of optical materials in grinding and lapping processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1): 34-41.
- 11 J A Menapace, P J Davis, W A Steele, *et al.*. MRF applications: Measurement of process-dependent subsurface damage in optical materials using the MRF wedge technique [C]. SPIE, 2005, 5991: 599103.
- 12 P Kumar, J Lee, G Lee, *et al.*. Low temperature wet etching to reveal sub-surface damage in sapphire substrates [J]. Applied Surface Science, 2013, 273(1): 58-61.
- 13 L Wong, T Suratwala, M Feit, *et al.*. The effect of HF/ NH_4F etching on the morphology of surface fractures on fused silica[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2009, 355(13): 797-810.
- 14 J Neauport, C Ambard, P Cormont, *et al.*. Subsurface damage measurement of ground fused silica parts by HF etching techniques[J]. Opt Express, 2009, 17(22): 20448-20456.
- 15 T A Germer, C C Asmail. Polarization of light scattered by microrough surfaces and subsurface defects[J]. JOSA A, 1999, 16(6): 1326-1332.
- 16 Xu Yi, Xu Yuxian, Hui Mei, *et al.*. Quantitative surface topography determination by differential interference contrast microscopy[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(3): 226-229.
许 谊, 徐毓娴, 惠 梅, 等. 微分相衬干涉显微镜定量测量表面形貌[J]. 光学精密工程, 2001, 9(3): 226-229.
- 17 Deng Yan, Xu Qiao, Chai Liqun, *et al.*. Total internal reflection microscopy: A subsurface defects identification technique in optically transparent components [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(6): 835-840.
邓 燕, 许 乔, 柴立群, 等. 光学元件亚表面缺陷的全内反射显微检测[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(6): 835-840.
- 18 Xu Peng, He Hong, Ding Zhihua. Research in subsurface morphologies of jades with optic coherence tomography [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0508004.
许 鹏, 何 红, 丁志华. 光学相干层析应用于玉石亚表面结构的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0508004.
- 19 Yang Lifeng, Wang Yafei. Application of laser in the ultrasonic detection technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(2): 29-32.
杨立峰, 王亚非. 激光在超声检测技术中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(2): 29-32.
- 20 Chen Yuhua. Research on the Visual Detetion of Subsurface Defects Using Magneto-Optic Microscopy[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007. 1-9.
程玉华. 探测亚表面缺陷的磁-光显微成像检测技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2007. 1-9.
- 21 Ma Bin, Shen Zhengxiang, Zhang Zhong, *et al.*. Fabrication and detection technique of fused silica substrate with extremely low subsurface damage[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(9): 2181-2185.
马 彬, 沈正祥, 张 众, 等. 低亚表面损伤石英光学基底的加工和检测技术[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9): 2181-2185.
- 22 J Neauport, P Cormont, P Legros, *et al.*. Imaging subsurface damage of grinded fused silica optics by confocal fluorescence microscopy[J]. Opt Express, 2009, 17(5): 3543-3554.
- 23 W B Williams, B A Mullany, W C Parker, *et al.*. Using quantum dots to tag subsurface damage in lapped and polished glass samples[J]. Appl Opt, 2009, 48(27): 5155-5163.
- 24 J H Wang, J Bartlett, A Dunn, *et al.*. The use of Rhodamine 6G and fluorescence microscopy in the evaluation of phospholipid-based polymeric biomaterials[J]. Journal of Microscopy, 2005, 217(3): 216-224.
- 25 A Penzkofer, W Leupacher. Fluorescence behaviour of highly

- concentrated Rhodamine 6G solutions [J]. Journal of Luminescence, 1987, 37(2): 61-72.
- 26 K Juškevičius, R Buzelis, S Kišas, *et al.*. Investigation of subsurface damage impact on resistance of laser radiation of fused silica substrates[C]. SPIE, 2013, 8885: 888529.
- 27 D W Camp, M R Kozlowski, L M Sheehan, *et al.*. Subsurface damage and polishing compound affect the 355-nm laser damage threshold of fused silica surfaces[C]. SPIE, 1997, 3244: 350-364.
- 28 B Lawn, R Wilshaw. Indentation fracture: Principles and applications[J]. Journal of Materials Science, 1975, 10(6): 1049-1081.
- 29 S He, R Gunda, R Singh. Effect of sliding friction on the dynamics of spur gear pair with realistic time-varying stiffness [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 301(3): 927-949.
- 30 Zhang Lei. FDTD Analysis of Surface Defects Related to Laser-Induced Damage on Optical Glass Surfaces [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, 2012. 27-33.
张磊. 与表面损伤有关的光学玻璃表面缺陷的时域有限差分分析[D]. 上海: 上海精密光学研究所, 2012. 27-33.

栏目编辑:张浩佳