

doi:10.3788/gzxb20164509.0912008

# 基于石英晶体天平和微纳光纤的有机污染物在线监测

朱政豪<sup>1,2</sup>, 郝艳飞<sup>1,2</sup>, 孙明营<sup>1</sup>, 庞向阳<sup>1</sup>, 刘志刚<sup>1</sup>, 朱健强<sup>1</sup>

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理重点实验室, 上海 201800)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**为了监测高功率激光驱动器中有机污染物的挥发特性以及其在光学元件表面的沉积特性,研究了基于石英晶体微量天平和微纳光纤传感器的真空腔体内有机物在线监测技术. 首先测试了不同分子态污染物浓度时石英晶体天平的响应性能,然后采用视角因子等分法对微纳光纤传感器和石英晶体天平进行对比实验,模拟有机污染物在光学表面沉积的特性. 实验结果表明,石英晶体天平和微纳光纤测试有机物在光学表面沉积时响应一致,均可用于高功率激光驱动器有机污染物的在线监测;当污染物面密度大于  $0.5 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$  时,微纳光纤传感器有较高精度和响应速度;有机污染物浓度越高,其更容易吸附沉积在光学元件表面.

**关键词:**高功率激光器;光学损伤;光学表面;污染物监测;光纤传感

中图分类号:TH74;TB79

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)09-0912008-6

## Online Detection of Airborne Molecular Contamination with Optical Microfiber and Quartz Crystal Microbalance

ZHU Zheng-hao<sup>1,2</sup>, HAO Yan-fei<sup>1,2</sup>, SUN Ming-ying<sup>1</sup>, PANG Xiang-yang<sup>1</sup>,  
LIU Zhi-gang<sup>1</sup>, ZHU Jian-qiang<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of High Power Laser and Physics, 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:** In order to monitor the volatilization and deposition of organic contaminants on optics surfaces in high power laser facility, online detection of airborne molecular contaminant was investigated based on quartz crystal microbalance and optical microfiber. First, the response performance of quartz crystal microbalance for different densities of airborne molecular contamination was tested. Then the comparison of quartz crystal microbalance and optical microfiber in detecting the surface mass density of airborne molecular contamination was implemented with the view factor method. The characteristics of airborne molecular contamination deposited on optical surface were also studied. The experiment results show that quartz crystal microbalance and optical microfiber have the similar response performance, and thus they can be applied in online airborne molecular contamination detection. When the surface mass density of airborne molecular contamination is larger than  $0.5 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ , optical microfiber is preferred due to the higher precision and larger response speed. The more the density of airborne molecular contamination is, the more it deposits on the optics.

**Key words:** High power laser; Laser damage; Optical surface; Pollution detection; Fiber sensing

**OCIS Codes:** 120.4640; 140.3330; 230.0040; 060.2300

基金项目:脉冲功率激光技术国家重点实验室开放研究基金(No. SKL2014KF05)资助

第一作者:朱政豪(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为高功率激光驱动器洁净控制. Email: zhuzhenghao2009@163.com

导师(通讯作者):刘志刚(1976-),男,研究员,博士,主要研究方向为惯性约束聚变装置的总体结构设计. Email: lzg\_siom@siom.ac.cn

收稿日期:2016-03-14;录用日期:2016-04-20

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

随着面向惯性约束聚变 (Inertial Confinement Fusion, ICF) 的高功率激光驱动器<sup>[1-2]</sup>的发展, 光学元件经受的激光通量也逐步提高, 污染物诱导光学元件损伤问题日益凸显, 成为阻碍驱动器进一步发展的重要因素. 在高功率激光系统中, 污染物分为分子态污染物 (Airborne Molecular Contamination, AMC) 和颗粒污染物<sup>[3]</sup>. 分子态污染物来源主要包括塑料、橡胶圈、润滑油等辅助材料的放气或挥发, 以及装置金属壁残留物在真空或者光照条件下的挥发, 这些放气或挥发物容易沉积在光学元件表面形成污染<sup>[4]</sup>. 在高通量激光辐照时, 光学元件表面附着的有机物污染物将吸收激光能量从而损伤破坏昂贵的大口径光学元件<sup>[5-6]</sup>, 降低光学元件寿命. 因此, 在离线清洗和安装集成过程中进行洁净控制的基础上, 必须对高功率激光系统中光学元件表面的污染情况进行实时监测从而采取严格的控制措施<sup>[7]</sup>. 搭建高精度在线污染物监测系统是实现高功率激光驱动器洁净控制和保证系统安全运行的必要手段.

法国兆焦耳激光装置 (Laser MégaJoule, LMJ) 中采用固体吸气剂采集有机物样品进行自动热脱附仪/气相色谱/质谱 (ATD/GC/MS) 联用技术检测, 可离线测量分析光学元件对材料放气的吸收<sup>[8]</sup>. 美国国家点火装置 (National Ignition Facility, NIF) 利用声表面波 (Surface Acoustic Wave, SAW) 传感器测量分子态污染等级. 声表面波传感器上镀有溶胶-凝胶膜 (Sol-gel Coating), 吸附分子态污染物时传感器探头表面质量增加, 从而引起探测器的声波共振频率改变, 基于该技术测试环境中 AMC 等级<sup>[9]</sup>. LMJ 的原型装置 (Laser Integration Line, LIL) 中采用镀有 200nm 电子沉积 SiO<sub>2</sub> 薄膜的石英晶体微量天平 (Quartz Crystal Microbalance, QCM) 模拟有机污染物在光学元件上的沉积<sup>[10]</sup>. 国内国防科学技术大学提出了微纳光纤 (Optical Microfiber, OM) 传感器在线监测有机污染物沉积的方法<sup>[11]</sup>. 中国工程物理研究院已开展了利用这种微纳光纤对激光装置密闭空间内部气溶胶分布变化进行监测的研究<sup>[12]</sup>. 在真空环境下微纳光纤对分子态污染物沉积的监测还需进一步的实验验证. 本文利用石英晶体微量天平和微纳光纤传感器测试有机污染物在真空条件下的沉积, 并采用视角因子等分法对石英晶体微量天平和微纳光纤传感器进行对比实验.

## 1 微纳光纤传感器和石英晶体天平传感器原理

### 1.1 微纳光纤传感器原理

微纳光纤探头采用高温拉丝技术将常规光纤制作

成强倏逝场导光传感纤维. 分子态污染物在静电吸附力和范德华力作用下很容易被吸附到微纳光纤上. 分子态污染物在微纳光纤沉积具有各向同性的特点, 沉积在微纳光纤表面的有机污染物形成如图 1 所示的薄膜包层<sup>[13]</sup>. 通过对微纳光纤探头的导光状态进行在线测量, 可实时监测沉积在微纳光纤探头上分子态污染物厚度, 表征有机污染物在光学元件表面的沉积状况<sup>[13]</sup>.

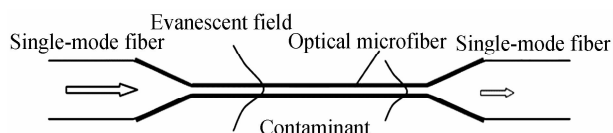


图 1 分子态有机污染物在微纳光纤表面形成薄膜示意图

Fig. 1 Sketch of thin AMC film on optical microfiber

有机污染物薄膜厚度和附加损耗之间的关系由最终的光场能量损耗与传播常数虚部的关系表征, 即

$$\text{Loss} = 20\beta_2 L \lg e \quad (1)$$

式中,  $\beta_2$  为三层光波导结构的复数传播常数的虚部, 对应于光能量的衰减,  $L$  为沿光场传输距离. 微纳光纤传感器的损耗与污染物吸附面质量密度呈较好的线性关系.

### 1.2 石英晶体微量天平原理

石英晶体微量天平是利用石英晶体的压电效应制造的高灵敏度传感器. 当分子态污染物沉积在石英晶体探头上, 会引起石英晶片质量的变化, 进而引起石英晶体振荡频率的变化. 根据 Sauerbrey 方程<sup>[14]</sup>, 石英晶体微量天平上沉积的污染物质量和晶体振荡频率变化具有较好的线性关系, 即

$$\Delta m = c \Delta f \quad (2)$$

目前石英晶体天平在监测航天器内光器件表面分子态污染物沉积中有广泛的运用<sup>[15]</sup>, 其高功率激光驱动器有机物监测方面国内还没有相关的研究. 实验使用的 QCM 探头采用双石英晶体设计, 其中一个为测试石英晶体, 另一个为参考石英晶体, 以消除温度变化对振动频率的影响. 石英晶体探头内有加热装置, 通过温度控制器保持探头恒温. 石英晶体微量天平的谐振频率一般分为 5 MHz、10 MHz、15 MHz、20 MHz、25 MHz 等 5 种. 其中谐振频为 10 MHz 的石英晶体天平, 理论质量传感系数  $c$  为  $4.42 \times 10^{-9} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ <sup>[16]</sup>.

### 1.3 污染物释放流场角度分布

塑料、橡胶圈、润滑油等污染源通过放气或挥发释放分子态污染物到腔体内, 分子态污染物分布与污染源的位置和尺寸等密切相关. 实验中为了定量地分析分子态污染物的沉积, 将污染源材料放在放气室内, 分子态污染物通过放气室的小孔向周围扩散, 如图 2<sup>[17]</sup>.

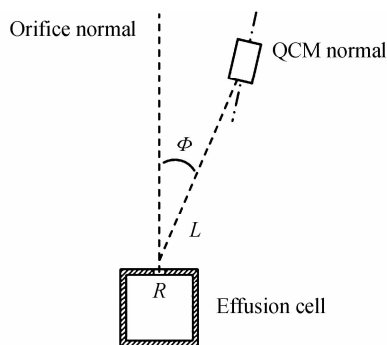


图2 石英晶体微量天平-放气室视角因子  
Fig.2 QCM-Effusion cell view factor angles

实验中真空腔内污染物从放气室小孔释放到有限长度的角流场分布为

$$B(\phi) = 1 - \frac{2}{\pi} (1-\lambda) [\sin(\rho) + \rho \sqrt{1-\rho^2}] + \frac{4}{3\pi} (1-3\gamma) \frac{1-(1-\rho^2)^{\frac{3}{2}}}{\rho} \quad (3)$$

式中,

$$\rho = \frac{L \tan \phi}{2R} \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{L^2 + 4R^2} - L}{2R + \frac{4R^2}{\sqrt{L^2 + 4R^2}}} \quad (5)$$

式中,  $R$  为放气孔半径,  $L$  为放气孔壁厚,  $\phi$  为放气孔中心沿线与天平探头法线的夹角<sup>[14]</sup>.

该模型反映了从放气室释放出来的有机污染物在空间中的分布,可以计算真空腔内不同位置的污染物浓度之比.

## 2 测试实验

### 2.1 实验装置

图3为真空环境下有机污染物在光学元件表面沉积的测量系统.真空腔体的真空度在  $10^{-3}$  Pa 以下.为了模拟高功率激光系统中有机物长时间挥发过程,采用了加热污染源的方式来缩短实验时间,研究其挥发和沉积特性.

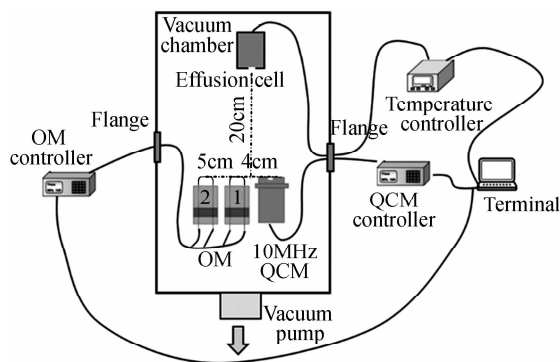


图3 有机污染物测试系统  
Fig.3 Organic contaminant detection system

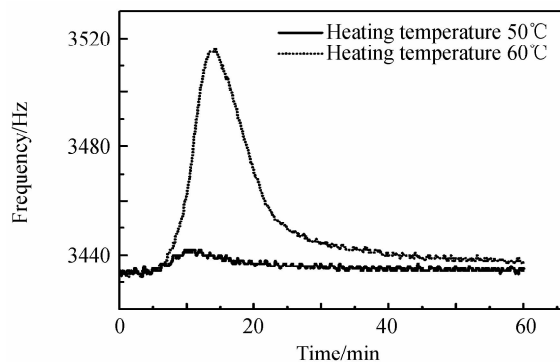
实验采用谐振频率为 10 MHz 的石英晶体探头.放气室上小孔直径为 3 mm,壁厚为 3 mm,天平接收面直径为 6 mm<sup>[17]</sup>,天平恒温控制为 30℃.放气室与石英探头和微纳光纤探头的距离均为 20 cm,以满足释放的污染物均匀等分 1000 份的要求<sup>[16]</sup>.

实验中石英天平的实际测试温度比理论温度高,所以质量传感系数  $c$  需要重新标定.在微纳光纤与石英天平对比实验之前,首先利用电缆皮作为污染物源,在恒温 30℃ 对石英探头进行了标定测试<sup>[18]</sup>,测得该环境下石英天平实际传感系数  $c$  为  $5.00 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ .

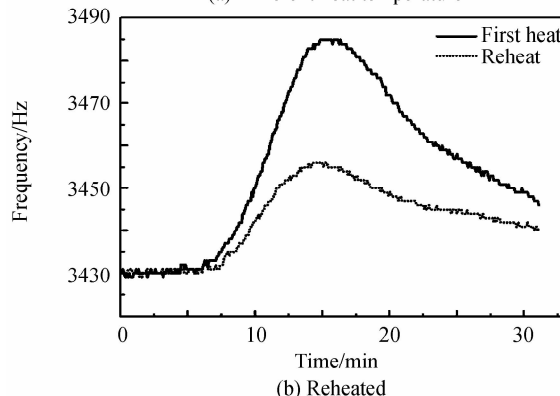
为了研究不同分子态污染物浓度下微纳光纤的响应特性,实验中采用了两个微纳光纤探头.微纳光纤探头 1 与石英天平探头的距离为 4 cm;放气室小孔位于它们的中心线上,以保证它们接收的污染物浓度相同.微纳光纤探头 1 和探头 2 之间距离为 5 cm.微纳光纤传感器均为裸光纤,腰区直径为 2  $\mu\text{m}$ , $\alpha$  为 0.2,均匀区域长度为 10 mm,光纤折射率为 1.451,周围环境折射率为 1,工作波长为 1 310 nm.实验采用电缆皮其常见成分为邻苯二甲酸二己酯 (DEHP),折射率约为 1.5,质量密度约为 0.986 g/cm<sup>3</sup>,在 1 310 nm 波长附近光吸收系数约为 0.27 mm<sup>-1</sup>,则微纳光纤传感器的测试理论灵敏度为  $4 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dB}^{-1}$ .

### 2.2 石英天平实验

首先测试了不同有机物挥发浓度时石英晶体天平的响应性能.分别采用不同的加热温度和加热次数改



(a) Different heat temperature



(b) Reheated

图4 污染物石英晶体天平测试

Fig.4 Organic contamination test with QCM

变有机物浓度,测得该环境下石英天平的谐振频率变化如图4.图4(a)为相同质量的电缆皮在50℃、60℃温度下加热15 min得到的石英探头曲线.加热温度越高,有机污染物释放越多,石英晶体接收到的污染物也就越多.图4(b)为两次加热同一电缆皮过程中石英探头频率变化曲线.电缆皮第一次加热到80℃,持续加热15 min,然后再将该电缆皮在真空腔中冷却至室温,再次加热至80℃,加热时长15 min.从曲线可以看出当再次对电缆皮加热后,石英天平上接收的污染物明显少于第一次加热.表明对污染源进行高温烘烤可以降低高功率激光驱动器中污染物的再次释放.因此,对所有可能产生分子态污染物的辅助材料进行高温烘烤预处理是减少在线分子态污染物产生的重要手段.

### 2.3 石英天平与微纳光纤的对比实验

随后进行石英晶体微量天平和微纳光纤传感器的对比实验,比较两种传感器在检测真空环境下有机污染物在光学元件表面的沉积特性中的性能.实验使用的石英晶体金电极上镀有1 mm厚的SiO<sub>2</sub>薄膜,其性质与裸光纤以及大多数的光学元件表面基本相同,可近似认为石英晶体探头和微纳光纤传感器对分子态污染物具有相同的粘附系数.

将已在干燥瓶中放置24 h的洁净电缆皮样品,用梅特勒分析天平称得其质量为0.400 18 g.实验前,将该电缆皮放置于洁净的放气室内,当真空腔体真空度达到 $1.0 \times 10^{-3}$  Pa时,放气室开始加热,加热温度为80℃,加热时长20 min.微纳光纤和石英晶体天平同时实时监测该过程中的分子态污染物的沉积特性.实验后取出电缆皮,在干燥瓶中放置2 h后,称取质量为0.393 31 g,则该实验过程电缆皮的质量损失为6.87 mg.

### 2.4 对比实验结果分析

图5为实验所获得的石英天平与微纳光纤的响应曲线对比.图5(a)为QCM在整个实验过程中的频率变化曲线.0时刻开机械泵,石英晶体频率逐渐降低,然后趋于稳定.这是由于空气中有些污染物粘附在石英晶片上,随着腔内真空度的降低,污染物逐渐解吸附,石英探头频率下降. $T_2$ 时刻放气室开始加热,电缆皮受热分解,有机物污染物释放到真空腔内,并沉积在石英晶体上,造成石英探头频率上升.加热时间到达 $T_3$ 时停止加热,此时石英探头频率临近峰值,随后迅速下降,最后趋于稳定,与加热前的频率基本一致.

微纳光纤传感器在开机械泵瞬间迅速饱和至35 dB,随后立即快速降低至2 dB左右.可能是由于机械泵回油或者真空腔内压强突然下降,残留在腔内的有机物气化,吸附在微纳光纤上,之后立即解吸附.图5(b)为微纳光纤在污染物释放过程中的曲线,该曲线不含开机械泵过程曲线.探头1在该过程中的最大损耗为1.62 dB,探头2最大损耗为0.12 dB,两者之比为

13.5.而根据角流场公式(3)可得,探头1所处位置的角流场值为0.936 5,探头2所处位置的角流场值为0.781 1,两者之比为1.19.由此可见沉积在微纳光纤上的污染物质量与污染物浓度为非线性关系.污染物浓度越高,更容易沉积在微纳光纤上.

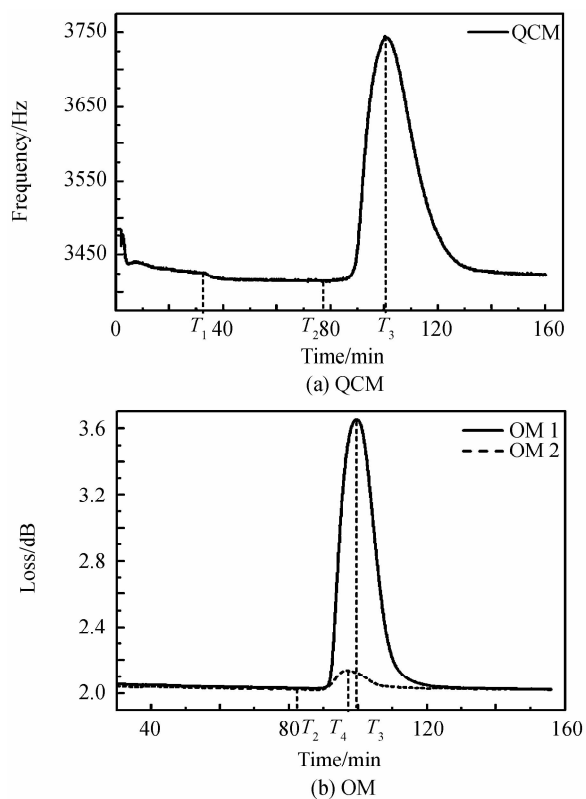


图5 QCM与OM的实验曲线对比

Fig. 5 Contrast experiment of QCM and OM

在该对比实验中电缆皮的质量损失为6.87 mg,根据视角因子1 000等分原理,则实际石英天平吸附污染物的面密度为

$$\sigma_R = \frac{\Delta m / 1000}{S} = 2.43 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$$

式中, $S$ 为石英晶体金电极面积.实验过程中,石英晶体天平的温度始终保持为30℃.石英晶体探头最大频率变化值为322 Hz.在之前的标定实验中得到该环境下石英天平实际传感系数 $c$ 值为 $5.00 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ ,则实验过程中石英天平接受面吸附污染物的面质量密度为

$$\sigma_{\text{QCM}} = c \cdot \Delta f = 1.61 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$$

通过对比发现 $\sigma_R$ 是 $\sigma_{\text{QCM}}$ 的1.5倍,两个数值十分接近.实验过程中微纳光纤的最大损耗为1.62 dB,则微纳光纤表面吸附的理论面密度为

$$\sigma_{\text{OM}} = D \cdot \delta L = 6.48 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$$

图6为不同时刻微纳光纤表面吸附污染物面密度和石英晶体天平对应的面密度.以放气室开始加热为时间起点,约7 min后放气室温度稳定为80℃,20 min时刻加热腔停止加热.0~7 min过程中,加热腔从室温

20℃逐渐升温至80℃,该过程放气室中的电缆皮缓慢升温,有机物污染物随着温度上升缓慢受热分解释放,所以微纳光纤和石英探头曲线变化平缓。

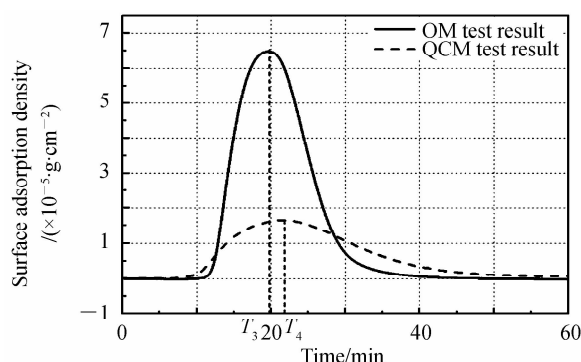


图6 微纳光纤和石英晶体天平测试污染物面质量密度对比  
Fig. 6 Measurement of surface mass density of AMC on OM and QCM

在第7 min时刻后,石英探头测得曲线上升趋势明显。而微纳光纤测得曲线在第10 min时刻以后才出现明显上升趋势,且曲线上升速率约为石英天平的6倍。这可能是在有机物浓度低的条件下,污染物分布不均匀,石英天平的接收面积较大容易沉积,而微纳光纤十分纤细,其长度仅为10 mm、直径为2 μm,与污染物粒子相互碰撞的概率较小。当污染物大量释放时,污染物在腔内广泛分布,微纳光纤曲线迅速上升,快速感应真空腔内有机物浓度变化。

第20 min时刻时,放气室停止加热。此时,微纳光纤接收到的污染物沉积密度达到最大,而石英晶体探头曲线略有延迟后在 $T_4$ 时刻达最大值,然后出现下降趋势。微纳光纤接收到的最大污染物沉积密度是石英天平所接收到的4倍。由于微纳光纤探头表面温度约为21℃,而石英晶体天平接收面温度为30℃,温度高不利于有机物的沉积,所以微纳光纤探头表面吸附面密度较大是合理的。污染物放气室停止加热后,污染物来源减少,真空泵将腔内残留的污染物抽出,腔内分子态污染物逐渐减少。微纳光纤曲线迅速下降,并趋于恢复至0。石英天平曲线下降缓慢,也最终趋于0。因此,在污染物面密度大于 $0.5 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ 条件下,微纳光纤具有响应快,灵敏度高的特点。

在模拟实验中,当污染源停止加热后,分子态污染物浓度迅速降低,沉积在传感器探头上的污染物解吸附。但在高功率激光系统中,如果光学元件表面沉积一定密度或厚度的分子态污染物,当激光辐照该区域时,分子态污染物将吸收激光能量,污染物熔化然后紧紧地粘在光学元件表面,其在光学表面附着的厚度随着激光次数的增加而增加。如果吸收激光能量足够多,将直接导致光学元件表面损伤。因此,石英微晶天平和微纳光纤用在高功率激光系统中监测光学元件表面分子态污染物时,可以通过污染物面质量密度进行表征。但

另一方面,还需将激光与表面附着分子态污染物的光学元件表面相互作用规律和传感器测得的污染物面质量密度变化规律进一步联系,才能让有机物在线监测装置更具实用价值。

### 3 结论

本文开展了基于石英晶体微量天平和微纳光纤传感器进行真空腔体内有机物在线监测技术的研究和应用。石英晶体微量天平的实验结果表明:污染源加热温度越高,挥发出的分子态污染物越多,其在石英天平上的沉积也越多;当污染源高温加热后再次加热时,其挥发的有机物减少,说明高温烘烤是减小真空中辅助材料放气的重要手段。基于微纳光纤实验,沉积在微纳光纤上的污染物质量与腔内污染物的浓度分布为非线性关系。有机污染物浓度越高,其更容易吸附沉积在微纳光纤上。

石英天平和微纳光纤的对比实验结果表明,相同条件下石英天平接受面吸附污染物面质量密度为 $2.43 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ ,微纳光纤表面密度为 $6.48 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ ,两者数据基本一致,曲线变化趋势十分吻合,说明石英晶体天平和微纳光纤在测试有机物在光学表面沉积时响应一致,均可用于高功率激光驱动器有机污染物在线监测。在污染物面密度大于 $0.5 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$ 条件下,微纳光纤传感器有较高精度和响应速度。

为了研究有机污染物在终端光学元件上的沉积,在后续实验中将开展探头表面镀sol-gel膜的石英晶体天平和微纳光纤的相关研究。

#### 致谢

感谢国防科学技术大学提供微纳光纤传感器样机。

#### 参考文献

- [1] HAYNAM C A, WEGNER P J, AUERBACH J M, *et al.* National ignition facility laser performance status[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(16): 3276-3303.
- [2] YIN Bing-yu, LI Guo-yang, LI Xue-chun, *et al.* High power laser facility front-end energy control system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0414001.  
殷冰雨, 李国杨, 李学春, 等. 高功率激光装置前端能量控制系统[J]. *光子学报*, 2014, **43**(4): 0414001.
- [3] RAMAN R N, DEMOS S G, SHEN N, *et al.* Damage on fused silica optics caused by laser ablation of surface-bound microparticles[J]. *Optical Express*, 2016, **24**(3): 2634-2647.
- [4] PRYATEL J A, GOURDIN W H, FRIEDERS S C, *et al.* Cleaning practices and facilities for the National Ignition Facility (NIF)[C]. SPIE, 2014:92372H.
- [5] HONIG J. Cleanliness improvements of national ignition facility amplifiers as compared to previous large-scale lasers [J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(12): 2904-2911.
- [6] STOWERS I F, HORVATH J A, MENAPACE J A, *et al.* Achieving and maintaining cleanliness in NIF amplifiers[C]. Monterey, Society for Optical Engineering, 1999: 609-620.
- [7] MIAO Xin-xiang, YUAN Xiao-dong, LÜ Hai-bing, *et al.* Experimental study of laser-induced damage of optical components surface owing to particle contamination in high

- power laser facility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(6): 0602001.
- 苗心向,袁晓东,吕海兵,等. 激光装置污染物诱导光学元件表面损伤实验研究[J]. 中国激光, 2015, **42**(6): 0602001.
- [8] FAVRAT O, MANGOTE B, TOVENA-P CAULT I, *et al.* Study of organic contamination induced by outgassing materials. Application to the laser MégaJoule optics [J]. *Applied Surface Science*, 2014, **293**: 132-137.
- [9] SOMMER S C, STOWERS I F, VAN DOREN D E. Clean construction protocol for the National Ignition Facility beampath and utilities [J]. *Journal of the IEST*, 2003, **46**: 85-97.
- [10] PEREIRA A, COUTARD J G, BECKER S, *et al.* Laser-induced damage in optical materials: Impact of organic contamination on 1064-nm laser-induced damage threshold of dielectric mirrors[C]. SPIE, 2006, **9237**: 64030I.
- [11] WEI Zheng-tong, SONG Zhang-qi, YU Yang, *et al.* Inline contaminants detection with optical microfiber in high-power laser system[C]. SPIE, 2013, **8911**: 104-107.
- [12] MIAO Xin-xiang, YUAN Xiao-dong, LU Hai-bing, *et al.* Contamination particles sensor based on microfiber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**(11): 222-225.
- 苗心向,袁晓东,吕海兵,等. 基于微纳光纤的气溶胶探测应用技术[J]. 强激光与粒子束, 2014, **26**(11): 222-225.
- [13] 卫正统. 微纳光纤倏逝场特性及微污染传感技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.
- [14] HAID B J, MALSBURY T N, GIBSON C R, *et al.* Measurement of total condensation on a shrouded cryogenic surface using a single quartz crystal microbalance[J]. *Fusion Science & Technology*, 2009, **55**(3): 276-282.
- [15] LI Na, YANG Dong-sheng, YU Qian, *et al.* Detection and analysis of contamination inside the spacecraft in vacuum thermal test[J]. *Vacuum*, 2013, **5**(3): 17-19.
- 李娜,杨东升,于钱,等. 卫星真空热试验室内污染检测分析[J]. 真空, 2013, **5**(3): 17-19.
- [16] ZHAO Jian-ping, ZANG Wei-guo, WANG Qing-xiang. Contamination monitoring techniques using quartz crystal microbalance in space environmental simulating test [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2001, **69**(4): 29-36.
- 赵建萍,臧卫国,王庆祥. 石英微量天平在环模试验中的污染监测技术[J]. 航天器环境工程, 2001, **69**(4): 29-36.
- [17] ASTM E1559 - 09, Standard test method for contamination outgassing characteristics of spacecraft materials[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2009.
- [18] ZANG Wei-guo, YU Qian. Calibration of quartz crystal microbalance for contaminated quantity measurement [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, **23**(6): 337-339.
- 臧卫国,于钱. 石英晶体微量天平污染量测试准确性的试验验证[J]. 航天器环境工程, 2006, **23**(6): 337-339.