

极紫外光刻机真空材料放气分率的单质谱测试方法研究

罗 艳, 王魁波, 吴晓斌

(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

摘要:水蒸气(H_2O)和碳氢化合物(C_xH_y)的放气分率是评价极紫外光刻机(EUVL)真空材料的重要参数。研究材料放气分率的传统方法一般需要2个完全相同的四极质谱计,这不仅大大增加了测试设备造价,而且会导致测试结果存在误差。为解决这一问题,本文仅采用1个四极质谱计,设计了一种EUVL真空材料评价装置。采用该装置测试了碳纤维增强树脂基复合材料层压板(CFRP板)和玻璃陶瓷板(GC板)在不同时间的放气组分、总放气率和放气分率。结果表明,CFRP板放出大量的 H_2O 和 C_xH_y ;虽然 C_xH_y 放气分率比 H_2O 下降快,但经10 h抽真空后,CFRP板仍可放出大量 C_xH_y ,且其总放气率高于经验阈值;GC板置于真空1 h后就不再放出 C_xH_y ,且其总放气率低于经验阈值;因此GC板比CFRP板更适用于极紫外光刻机真空系统。基于单质谱的放气分率测试方法可用于指导极紫外光刻机真空材料的选择。

关键词:极紫外光刻机(EUVL);真空材料;放气分率;四极质谱计(QMS)

中图分类号: TB74; O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2018)04-0392-07

doi: 10.7538/zpzb.2017.0142

Measurement Study on Materials' Partial Outgassing Rate for EUVL Vacuum System Based on Single Quadrupole Mass Spectrometer

LUO Yan, WANG Kui-bo, WU Xiao-bin

(Academy of Opto-Electronics (AOE), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: In the prediction of vacuum performance of the ultraviolet lithography (EUVL) tool, making the right material choices for various parts of vacuum system means the difference between success and failure for the project as a whole. To meet the outgassing budget of the vacuum minienvironment in the material designing, outgassing behavior is an important evaluation criterion, including total outgassing rate, outgassing species and partial outgassing rate of water (H_2O) and hydrocarbons (C_xH_y), for a certain amount of which will either absorb EUV light or contaminate optical mirrors. In order to have a comprehensive measurement, equipment containing single sample cham-

收稿日期: 2017-08-16; 修回日期: 2017-10-31

基金项目: 极紫外光刻机关键技术研究项目(2012ZX02702)资助

作者简介: 罗 艳(1987—), 女(汉族), 四川人, 工程师, 从事极紫外真空材料放气研究。E-mail: luoyan@aoe.ac.cn

通信作者: 吴晓斌(1979—), 男(汉族), 浙江人, 副研究员, 从事极紫外光刻机真空系统研究。E-mail: wuxiaobin@aoe.ac.cn

网络出版时间: 2018-05-28; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2979.TH.20180528.0853.002.html>

ber, a pumping system, a purging channel and a detecting set was established. In consideration of the cost reduction, test error lessening and practical engineering requirement, the orifice throughput method together with only one quadrupole mass spectrometer (QMS) was employed. Afterwards, the nitrogenous equivalent value of total and partial outgassing rates could be acquired, following the effective pumping rate and the partial pressure were calibrated at first through introducing nitrogen. With the purpose of verifying the correctness of the new principle and having a wise judgement, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminates and glass ceramics (GC) were selected as detection objects, because they were the potential option to serve the circuit board. An outgassing experiment of different time was conducted on them using the above device to obtain their gas mass spectrums, partial and total outgassing rates. The results revealed that CFRP let out a lot of water and hydrocarbons and a mass of hydrocarbons were still released even after 10 h pumping in spite of that hydrocarbons' partial outgassing rate dropped quicker than that of water. Besides, its total outgassing rate was beyond of the experiential threshold value. On the contrary, no hydrocarbon was given off after a period as short as 1 h pumping for GC sample, along with its total outgassing rate below the experiential threshold value. As a consequence, GC material is more suitable for EUVL vacuum system than CFRP in terms of the vacuum characteristic merely. However, from the view of materials' thermal property which is important in the circuit board level test, GC has a lower thermal conductivity than CFRP, and thus the proper material is still under investigation. It is proposed that, for the researcher, more material properties of mechanical, thermal, optical, electrical, magnetic, chemical and so on should also be taken into account in addition to the vacuum character, when putting one material into practical environmental use.

Key words: extreme ultraviolet lithography (EUVL); vacuum material; partial outgassing rate; quadrupole mass spectrometer (QMS)

极紫外光刻(EUVL)技术是获得 10 nm 及以下光刻节点最有前景的技术之一^[1]。由于空气及绝大多数材料均对 13.5 nm 的极紫外(EUV)光具有强烈的吸收作用,因而 EUVL 的光学微环境必须为真空^[2]。材料在真空中会溶解、解吸而放气^[3],放出的部分气体不仅会吸收 EUV 光,还会污染光学镜片,如水蒸气(H₂O)会氧化镜片,碳氢化合物(C_xH_y)会在镜片上沉积碳层^[4]。因此,EUVL 真空系统不仅对所用材料总放气率的大小有要求,对材料放出的气体分压也有严格限制,进行 EUVL 设计时,必须根据真空微环境的总压和分压指标推测所用材料的总放气率和放气分率。碳纤维板在纤维方向上有优异的导热性能,是电路板结构设计的优选材料,但由于极紫外真空环境的特殊要求,需要测试碳纤维板的真空放气行为,包括放

气组分、放气分率和总放气率,从而评估其在 EUVL 真空系统中的适用性。

近年来,测试材料的放气分率已成为研究热点,尤其在搭建真空设备方面尤为重要。一方面,各放气组分的分压会随材料、温度和时间等因素发生变化;另一方面,流导和电离规真空度测量与气体组分均相关。1995年,德国葛利克大学采用小孔流导法,利用2个对称结构的质谱计测得金属材料的放气分率,并指出若只考虑总放气率,而不考虑放气组分,会引起放气率随时间变化的曲线误差^[5]。2013年,兰州空间物理研究所在小孔流导法基础上,提出了利用2个四极质谱计分别检测小孔两端某单一气体分压的放气分率测试方法^[6]。

研究材料放气分率的方法一般需要2个完全相同的四极质谱计,四极质谱计的位置(如小

孔上下游)、参数设置^[7-9]、使用频率和老化程度均会改变测试结果;另外,采用质谱计精准测试分压,一般需大量标准气体校准灵敏度^[10-11],且一旦改变质谱计参数设置或质谱计老化,均需重新校准,而在实际应用中,往往更关注测试相对值。所以,传统方法不仅大大增加了测试设备制造造价,而且会导致测试结果产生误差。

基于此,本工作提出一种 EUVL 真空材料放气分率单质谱测试方法,用于评价碳纤维增强树脂基复合材料层压板(CFRP 板)的真空性能,并选用玻璃陶瓷板(GC 板)作为对照,希望为筛选 EUVL 真空结构材料提供一种有效的方法。

1 测试原理与装置

1.1 测试原理

由于 EUVL 真空微环境为动态真空,因此需采用动态法测试材料的放气分率。目前流导法是国内外常用的动态放气率测试方法^[12]。小孔流导法是将样品放出的气体通过 1 个小孔抽走,测量气体通过小孔两端形成动态平衡时的分压力,结合小孔流导和样品表面积计算得出放气分率,示于式(1)^[6]。

$$q_i = \frac{C_i \cdot (P_{ui} - P_{di})}{A} \quad (1)$$

式中, q_i 为样品的放气分率; A 为样品的表面积; C_i 为小孔对某气体的流导值; P_{ui} 、 P_{di} 分别为小孔上、下游室的分压力。

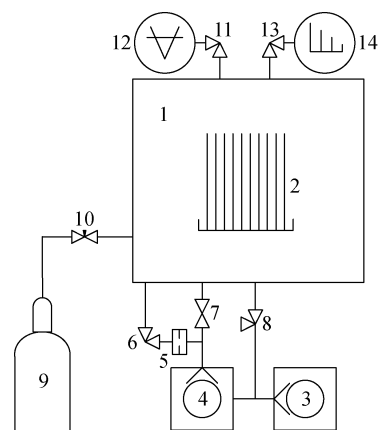
1.2 装置设计

测试装置包括样品室、抽气系统、进气通道和检测组件,原理示于图 1。

将样品室设计成圆柱形容器,腔室材料为经高温真空除氢处理的 316L 不锈钢。样品室的抽气系统包括 3 个通道:第一抽气通道由干泵和角阀组成,用于样品室的粗抽;第二抽气通道由干泵、磁悬浮分子泵和插板阀组成,用于样品室的精抽;第三抽气通道由干泵、磁悬浮分子泵、小孔和角阀组成,用于测试放气分率。样品室的极限真空度可达 10^{-8} Pa,小孔流导约为 100 L/s。

采用经氮气校准的气体流量控制仪来控制测量进气流量。通过进气通道,可适时向样品室充入校准气体,以校准质谱计的测量分压

和测试放气分率时的有效抽速。样品室的检测组件包括 1 个电离规和 1 个质谱计。采用德国 Leybold 的 IE514 电离规精确测量腔室的压力,测量范围为 $10^{-3} \sim 10^{-9}$ Pa,经氮气精确校准;采用美国 Inficon 公司的 H200M 四极质谱计测量样品室的气体组分和分压,其同时具有法拉第杯和二次电子倍增器探测器,质量扫描范围为 m/z 1~200,最小可检分压约 1×10^{-10} Pa。



注:1. 样品室;2. 样品;3. 干泵;4. 分子泵;
5. 小孔;6,8,11,13. 角阀;7. 插板阀;9. 气瓶;
10. 气体流量控制仪;12. 电离规;14. 四极质谱计
图 1 EUVL 真空材料放气测试装置原理图
Fig. 1 Schematic diagram of the outgassing test system for the EUVL vacuum material

2 测试方法与计算

2.1 测试方法

2.1.1 校准有效抽速 依次采用第一、第二抽气通道对样品室抽真空,达到极限真空后,关闭第二抽气通道,打开第三抽气通道和进气通道,向样品室充入流量为 Q 的高纯氮气,小孔两端达到动态平衡后,使用电离规测量样品室真空度为 P ,则第三抽气通道的有效抽速 $S_e = Q/P$ 为有效抽速的氮气当量值。

2.1.2 校准分压 依次采用第一、第二抽气通道对样品室抽真空,达到极限真空后,关闭第二抽气通道,打开第三抽气通道和进气通道,向样品室充入稳定流量的高纯氮气,使样品室真空度维持在 10^{-6} Pa 左右,待样品室中 95% 以上气体为氮气($P_{18}/P_{28} < 0.05$)时,分别记录电离规显示的真空度 P 和四极质谱计显示的氮气分压值 P_{28} ,二者之比值即为四极质谱计测试

分压的修正因子 $C = P/P_{28}$ 。放气分率计算过程中,测得的分压需要乘以此修正因子得到分压的氮气当量值。校准时选用相对稳定的法拉第杯探测器,发射电流为 $2\ 000\ \mu\text{A}$,电子能量为 $102\ \text{eV}$,扫描速率为 $32\ \text{ms/u}$ 。

2.1.3 样品测试 选用碳纤维增强树脂基复合材料层压板作为测试对象,选用玻璃陶瓷板作为对比样品。样品尺寸均为 $90\ \text{mm} \times 80\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$,数量均为7片。测试前,用无尘布将样品擦拭干净并在空气中静置 $12\ \text{h}$,将装置烘烤除气 $24\ \text{h}$,冷却至室温,采用四极质谱计检测样品室的洁净度,保证系统未被碳氢化合物污染,放气测试温度为 $(23 \pm 1)\ ^\circ\text{C}$ 。将预处理后的样品置于样品室中。

依次采用第一、第二抽气通道对样品室抽真空,达到极限真空后,关闭第二抽气通道,采用第三抽气通道抽真空,从第三抽气通道抽气时开始计时,每间隔 $1\ \text{h}$ 记录1次样品室的真空度和分压谱图,至少测试 $10\ \text{h}$ 。测试分压时,保持四极质谱计参数设置与校准时完全相同。测试完成后,将样品取出,以完全相同的步骤测试系统本底。

2.2 数据计算

2.2.1 水蒸气(H_2O)放气分率计算 未放入样品时,本底的 H_2O 放气分量 $Q_{\text{bg},\text{H}_2\text{O}}$ 计算公式示于式(2)。

$$Q_{\text{bg},\text{H}_2\text{O}} = S_e \cdot P_{\text{bg},18} \cdot \frac{P_{\text{bg}}}{\sum_{i=1}^{200} P_{\text{bg},i}} \quad (2)$$

其中, $P_{\text{bg},18}$ 为本底 H_2O ($18\ \text{u}$) 的分压, P_{bg} 为电离规测得的本底总压, $\sum_{i=1}^{200} P_{\text{bg},i}$ 为本底各质量数分压之和, S_e 为第三抽气通道有效抽速。

放入样品后,按式(3)计算样品和本底的 H_2O 放气分量 $Q_{\text{s},\text{H}_2\text{O}}$ 。

$$Q_{\text{s},\text{H}_2\text{O}} = S_e \cdot P_{s,18} \cdot \frac{P_s}{\sum_{i=1}^{200} P_{s,i}} \quad (3)$$

其中, $P_{s,18}$ 为放入样品后 H_2O ($18\ \text{u}$) 的分压, P_s 为放入样品后电离规测得的总压, $\sum_{i=1}^{200} P_{s,i}$ 为放入样品后各质量数分压之和。

样品的 H_2O 放气分率 $q_{\text{H}_2\text{O}}$ 计算见式(4):

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{Q_{\text{s},\text{H}_2\text{O}} - Q_{\text{bg},\text{H}_2\text{O}}}{A} = \frac{S_e}{A} \cdot \left(P_{s,18} \cdot \frac{P_s}{\sum_{i=1}^{200} P_{s,i}} - P_{\text{bg},18} \cdot \frac{P_{\text{bg}}}{\sum_{i=1}^{200} P_{\text{bg},i}} \right) \quad (4)$$

式中, A 为样品的总表面积, H_2O 仅考虑了 m/z 18 的谱峰值,并将四极质谱计测得各质量数分压之和相对于电离规测得的总压进行归一化处理,故计算得到的 H_2O 放气分率是相对于氮气的当量值。

2.2.2 碳氢化合物(C_xH_y)放气分率计算 由于 C_xH_y 存在碎片峰且可能相互重叠,很难准确定量分析单一 C_xH_y 的分压^[13],因此将 $m/z \geq 45$ 的气体均归为 C_xH_y 。与 H_2O 放气分率计算相同,将四极质谱计测得各质量数分压之和相对于总压进行归一化处理,得到 C_xH_y 放气分率相对于氮气的当量值。

未放入样品时,本底的 C_xH_y 放气分量 $Q_{\text{bg},\text{C}_x\text{H}_y}$ 由式(5)计算。

$$Q_{\text{bg},\text{C}_x\text{H}_y} = S_e \cdot \sum_{i=45}^{200} P_{\text{bg},i} \cdot \frac{P_{\text{bg}}}{\sum_{i=1}^{200} P_{\text{bg},i}} \quad (5)$$

其中, $\sum_{i=45}^{200} P_{\text{bg},i}$ 为本底的 C_xH_y (m/z 45~200) 分压之和, P_{bg} 为电离规测得的本底总压, $\sum_{i=1}^{200} P_{\text{bg},i}$ 为本底各质量数分压之和。

放入样品后,样品和本底的 C_xH_y 放气分量 $Q_{\text{s},\text{C}_x\text{H}_y}$ 按式(6)计算。

$$Q_{\text{s},\text{C}_x\text{H}_y} = S_e \cdot \sum_{i=45}^{200} P_{s,i} \cdot \frac{P_s}{\sum_{i=1}^{200} P_{s,i}} \quad (6)$$

其中, $\sum_{i=45}^{200} P_{s,i}$ 为放入样品后的 C_xH_y (m/z 45~200) 分压之和, P_s 为放入样品后电离规测得总压, $\sum_{i=1}^{200} P_{s,i}$ 为放入样品后的各质量数分压之和。

样品的 C_xH_y 放气分率 $q_{\text{C}_x\text{H}_y}$ 由式(7)计算。

$$q_{\text{C}_x\text{H}_y} = \frac{Q_{\text{s},\text{C}_x\text{H}_y} - Q_{\text{bg},\text{C}_x\text{H}_y}}{A} = \frac{S_e}{A} \cdot \left(\sum_{i=45}^{200} P_{s,i} \cdot \frac{P_s}{\sum_{i=1}^{200} P_{s,i}} - \sum_{i=45}^{200} P_{\text{bg},i} \cdot \frac{P_{\text{bg}}}{\sum_{i=1}^{200} P_{\text{bg},i}} \right) \quad (7)$$

2.2.3 总放气率计算 当小孔两端达到真空动态平衡后,样品的总放气率 q_{total} 可采用式(8)计算。

$$q_{\text{total}} = \frac{S_c}{A} \cdot \left(\sum_{i=1}^{200} P_{s,i} - \sum_{i=1}^{200} P_{\text{bg},i} \right) \quad (8)$$

其中 $\sum_{i=1}^{200} P_{\text{bg},i}$, $\sum_{i=1}^{200} P_{s,i}$ 分别与式(5)、式(6)中含义相同。

3 结果与讨论

3.1 放气组分

本底第 10 h 的放气组分谱图示于图 2,可见,本底非常干净,除了 H_2 (m/z 2)、 H_2O (m/z 18)、 CO/N_2 (m/z 28) 和 CO_2 (m/z 44) 外,无 C_xH_y 污染物。扣除本底后,CFRP 板、GC 板第 10 h 的放气组分谱图示于图 3。CFRP 板放出的气体主要有: H_2 (m/z 2)、 H_2O (m/z 18)、 CO/N_2 (m/z 28)、 O_2 (m/z 32)、 Ar (m/z 40)、 CO_2 (m/z 44) 和大量 C_xH_y ($m/z \geq 45$),即使经

10 h 的抽气,CFRP 板在真空中仍能放出大量水和碳氢化合物。GC 板放出的气体主要有: H_2 、 H_2O 、 CO/N_2 和 CO_2 ,无 C_xH_y 污染物,与本底放气组分完全一致,各气体分压值均比本底高。

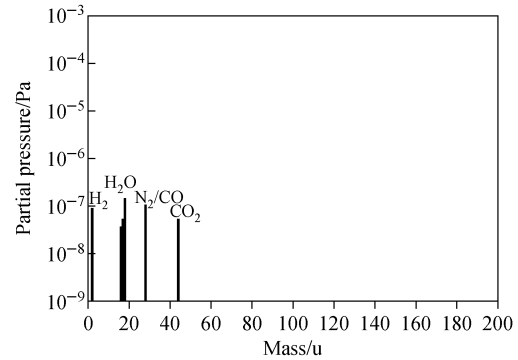


图 2 本底第 10 h 的放气组分谱图

Fig. 2 Mass spectrum of the gases desorbed from background after outgassing for 10 h

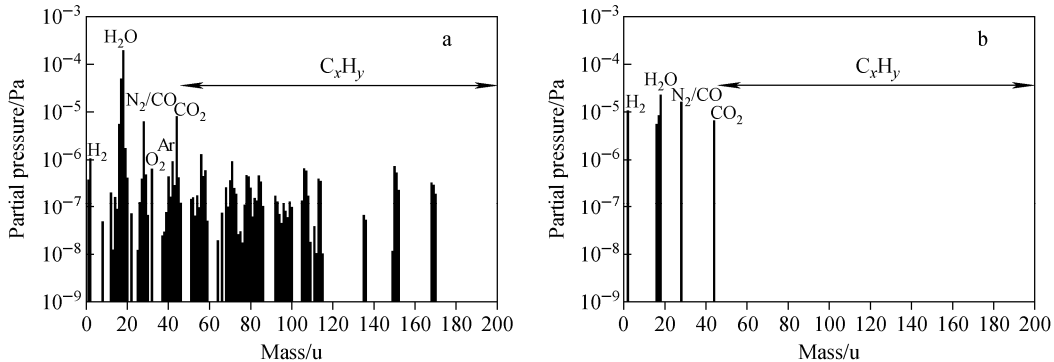


图 3 CFRP 样品 (a), GC 样品 (b) 第 10 h 的放气组分谱图

Fig. 3 Mass spectra of the gases desorbed from CFRP sample (a) and GC sample (b) after outgassing for 10 h

3.2 总放气率和放气分率

CFRP 板和 GC 板的总放气率、 H_2O 和 C_xH_y 放气分率随抽气时间的变化曲线示于图 4。CFRP 板第 1 h 的总放气率为 $1.82 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{cm}^2)$, 其中, H_2O 和 C_xH_y 的放气分率分别为 1.57×10^{-7} 、 $1.73 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。GC 板第 1 h 的总放气率为 $3.21 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{cm}^2)$, 其中, H_2O 和 C_xH_y 的放气分率分别为 2.48×10^{-8} 、 $1.25 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。总放气率、 H_2O 和 C_xH_y 的放气分率均随抽气时间增加呈缓慢下

降趋势,且 CFRP 板比 GC 板的各个对应值高; GC 板放入真空 1 h 后就不再放出 C_xH_y , 而 CFRP 板经过 10 h 的抽气后仍能放出大量 C_xH_y 。

根据扩散放气模型^[14],材料放出的各气体组分的放气分率和放气时间的关系可用式(9)表示^[15]。

$$q_i(t) = q_{i10} \cdot \left(\frac{t}{10} \right)^{-\alpha_i} \quad (9)$$

其中, $q_i(t)$ 为第 t h 组分 i 的放气分率; q_{i10} 为第 10 h 组分 i 的放气分率; t 为放气时间, 单位为 h; α_i 为放气时间指数, 其值与放气分率

下降速度有关。

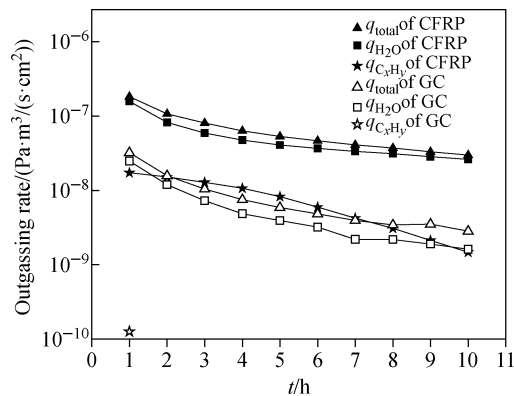


图4 样品总放气率和放气分率随时间变化曲线

Fig. 4 Time dependence of the total and partial outgassing rate

将式(9)等号两边取对数可得式(10),在有限的放气测试时间内,可根据前10 h的放气分率测试数据计算两种材料各放气组分的放气时间指数 α_i ,从而判断放气分率的下降趋势。CFRP板的 H_2O 放气时间指数为0.65, C_xH_y 放气时间指数为1.80;GC板的 H_2O 放气时间指数为1.24。说明CFRP板 C_xH_y 比 H_2O 的放气分率随时间下降更快,GC板比CFRP板的 H_2O 放气分率随时间下降更快,即前者对抽气时间更敏感。

$$\alpha_i = \frac{\lg(q_{i10}) - \lg(q_{i1})}{\lg(0.1)} \quad (10)$$

在EUVL的材料设计阶段,可采用第1 h的总放气率进行初步评估。一般经1 h抽气后总放气率大于 $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 的材料即可拒绝使用。CFRP板、GC板第1 h的总放气率分别为 1.82×10^{-7} 、 $3.21 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{s} \cdot \text{cm}^2)$,前者不符合EUVL真空材料使用原则。EUVL的真空准备约10 h后,各真空微环境需满足污染控制的所有技术指标,以达到曝光要求,并且要求在整个曝光过程中污染物仍可控制在正常范围内。CFRP板在真空中放出 C_xH_y 的放气分率虽然随时间下降较快,但经过10 h抽气后仍可放出大量的 C_xH_y 污染物,这与材料本身结构中含有大量树脂基有关;GC板放入真空1 h后就不再放出 C_xH_y 。因此,仅从材料真空性能方面讨论,极紫外光刻

机真空系统应避免使用碳纤维板材料,玻璃陶瓷材料可应用于极紫外光刻机真空系统。然而,考虑到玻璃陶瓷材料的导热性较差,仍然不能将其用于极紫外光刻机的板级电子学系统。适用于极紫外光刻机板级电子学系统电路板的材料仍需进一步探索。

3 结论

根据极紫外光刻机真空材料放气分率测试需求,设计采用基于小孔流导法的单质谱测试装置,测试碳纤维板和玻璃陶瓷板不同时间的放气组分、放气分率和总放气率。该装置只安装了1个四极质谱计,结构简单,避免了使用2个四极质谱计带来的造价高和测试误差问题。通过将未校准的四极质谱计和已校准的电离规对比校准,使测得的分压和总压均为氮气当量值。数据计算时,以电离规测量值为基准,将四极质谱计测得的各质量数分压之和相对于电离规测得的总压进行归一化处理,从而得到的放气分率和总放气率均为氮气当量值。实验结果表明,基于单质谱的放气分率测试方法可用于指导极紫外光刻机真空材料的选择。

参考文献:

- [1] KOBAYASHI S, SANTILLAN J J, ITANI T. Quantitative analysis of EUV resist outgassing [J]. Proc of SPIE, 2008, 6 923(692 345): 1-9.
- [2] MERTENS B M, VANDER Z B, DEJAGER P W H, et al. Mitigation of surface contamination from resist outgassing in EUV lithography [J]. Microelectronic Engineering, 2000, 53: 659-662.
- [3] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京:国防工业出版社,2004:1 040-1 083.
- [4] KOSTERA N, MERTENSA B, JANSENA R. Molecular contamination mitigation in EUVL by environmental control [J]. Microelectronic Engineering, 2002, 61(62): 65-76.
- [5] SCHINDLER N, SCHLEURNER D, EDELMANN C. Measurement of partial outgassing rates [J]. Vacuum, 1996, 47(4): 351-355.
- [6] 冯焱,董猛,吴晓斌,等. 基于分压力测量的真空材料放气率测试方法研究 [J]. 真空, 2013, 50(4): 49-52.

FENG Yan, DONG Meng, WU Xiaobin, et al.

- Study on method for measuring vacuum materials partial outgassing rate[J]. *Vacuum*, 2013, 50(4): 49-52(in Chinese).
- [7] 夏体锐,杨洪广,胡勇,等. 热脱附谱方法的脱附速率灵敏度与四极质谱仪参数关系的实验研究[J]. *质谱学报*,2012,33(5):271-279.
XIA Tirui, YANG Hongguang, HU Yong, et al. Influence of parameters of quadrupole mass spectrometer on desorption rate sensitivity of thermal desorption spectroscopy[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2012, 33(5): 271-279(in Chinese).
- [8] 秦城. 四极质谱工作参数优化技术的研究[C]//中国核学会 2009 年学术年会. 北京:原子能出版社,2010:550-558.
- [9] 高斌,李得天,成永军. 超高真空下小型四极质谱计的性能研究[J]. *真空与低温*,2011,17(2): 80-84.
GAO Bin, LI Detian, CHENG Yongjun. Performance study of aminiature quadrupole mass spectrometer in ultra-high vacuum. *Vacuum and Cryogenics*, 2011, 17(2): 80-84(in Chinese).
- [10] 任国华,张涤新,赵澜. 四极质谱计校准技术发展现状[C]//中国真空学会 2012 学术年会. 兰州,2012:108.
- [11] 查良镇,朱秀珍,陈旭. 四极质谱计校准和应用研究系统[J]. *真空科学与技术*,1993,13(6): 405-412.
ZHA Liangzhen, ZHU Xiuzhen, CHEN Xu. A calibration and application study system for quadrupole mass spectrometer[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 1993, 13(6): 405-412(in Chinese).
- [12] YANG Y, SAITOH K, TSUKAHARA S. An improved throughput method for the measurement of outgassing rates of materials[J]. *Vacuum*, 1995, 46(12): 1 371-1 376.
- [13] 王欲知,陈旭. *真空技术*[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007:434-444.
- [14] KWON J S, JUNG H, YEO I S, et al. Outgassing characteristics of polycarbonate core material for vacuum insulation panels[J]. *Vacuum*, 2011, 85: 839-846.
- [15] 罗艳,王魁波,张罗莎,等. 聚合物的放气分率与放气模型研究[J]. *真空科学与技术学报*,2015, 35(9):1 100-1 104.
LUO Yan, WANG Kuibo, ZHANG Luosha, et al. Modelling and characterization of polymer outgassing behavior[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, 35(9): 1 100-1 104(in Chinese).