

文章编号: 0258-7025(2009)11-3055-05

# 环境气氛及气压对增透膜真空激光损伤的影响

凌秀兰<sup>1,2,3</sup> 李大伟<sup>1</sup> 赵元安<sup>1</sup> 李淑红<sup>1,2</sup> 邵建达<sup>1</sup> 范正修<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所光学薄膜技术研究与发展中心, 上海 201800; <sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039)  
<sup>3</sup>中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

**摘要** 利用 1-on-1 损伤测试方法, 测试了真空和空气、氧气、氮气、氦气环境下在波长为 1064 nm 处增透膜 (ARF) 的激光损伤阈值和损伤形貌。结果表明, 真空环境下的损伤阈值明显低于大气环境下的损伤阈值, 真空环境下的破斑形貌也与大气环境下的破斑形貌有显著差异。在真空环境下存入一定量的氧气、氮气和氦气后薄膜的损伤阈值都得到提高, 但存入的气体的种类及气压不同, 损伤阈值与破斑形貌也不尽相同。

**关键词** 薄膜; 增透膜; 1-on-1; 环境气氛; 激光损伤阈值; 损伤形貌

**中图分类号** O484 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.3055

## Effects of Environments and Gas Pressures on Laser-Induced Damage of Anti-Reflection Films

Ling Xiulan<sup>1,2,3</sup> Li Dawei<sup>1</sup> Zhao Yuan'an<sup>1</sup> Li Shuhong<sup>1,2</sup> Shao Jianda<sup>1</sup> Fan Zhengxiu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research & Development Center of Optical Thin Film Coatings, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China  
<sup>3</sup> Department of Information Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** Laser damage threshold and damage morphology at the wavelength of 1064 nm are tested in vacuum, air, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He<sub>2</sub> environments by using 1-on-1 testing method. The results show that compared to normal atmospheric conditions, anti-reflection films (ARF) have a decreasing laser induced damage threshold under vacuum environments. The morphology of the damaged sites showed a particular difference under two conditions. In vacuum environment with a few O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He<sub>2</sub>, laser induced damage threshold of anti-reflection films increased. Different gas environments and gas pressure result in different laser induced damage thresholds and damage morphology.

**Key words** thin films; anti-reflection films; 1-on-1; environments and gas pressures; laser-induced damage threshold; damage morphology

## 1 引 言

长期以来, 激光对光学薄膜的破坏<sup>[1,2]</sup>是影响光学薄膜元件使用寿命的主要原因。随着激光系统在空间领域和真空环境的广泛应用, 光学薄膜在真空环境的应用越来越广泛, 已有研究表明当环境条件改变时光学薄膜的光谱性能和损伤行为会发生极大改变<sup>[3]</sup>。相对于大气环境, 真空环境下光学薄膜元件的激光损伤问题具有自身的特殊性, 使得影响

光学薄膜元件激光损伤的因素大大增加。真空环境下会出现材料的放气过程、激光辐照材料分解过程、游离粒子的附着过程等。光学介质薄膜的激光损伤阈值在真空环境中会极大地降低<sup>[4~11]</sup>。光学元件在真空状态下的激光负载能力直接关系激光系统在真空环境中运行的成败。因此, 研究光学薄膜的真空激光损伤特性, 提高光学薄膜真空激光负载能力, 目前显得尤为迫切与重要。

收稿日期: 2008-11-17; 收到修改稿日期: 2009-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(60708004)资助项目。

作者简介: 凌秀兰(1974—), 女, 博士研究生, 主要从事真空激光损伤方面的研究。E-mail: nmlxlmiao@126.com

导师简介: 邵建达(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光薄膜方面的研究。E-mail: jdshao@opfilm.com

为了研究真空环境中光学薄膜的激光损伤行为,各国相继开展了真空环境下光学薄膜的激光损伤研究。2005年德国空间中心为了研究真空激光损伤行为建立了真空激光损伤测试装置<sup>[12]</sup>。通过该装置测试 ALADIN 激光系统中各种光学器件的真空激光损伤行为。美国国家航空航天局(NASA)下属的戈达德航天中心(GSFC)以及法国 LIL 激光系统的研究人员也搭建了模拟真空环境的损伤测试装置<sup>[13]</sup>。因此为了提高光学薄膜的真空抗损伤能力,必须深入研究用于真空系统的各类光学薄膜元件的激光损伤行为。增透膜(ARF)是真空环境中广泛使用的光学薄膜元件,本文研究了增透膜在不同环境气氛及气压下的损伤行为,并对真空与各种气氛环境下的损伤差异进行了讨论。

## 2 实验过程

### 2.1 实验装置和方法

测试系统主要由3部分组成:真空系统、监测系统和激光系统。如图1所示,其中真空系统主要由真空腔室和真空泵组(分子泵与机械泵)组成,最高真空度可达到 $1 \times 10^{-3}$  Pa,提供了测试所需的真空环境。监测系统主要对真空度、真空腔中的气体成分以及激光束斑等实验参数进行监测。在激光系统中,辐照被测样品的主激光 Nd:YAG 激光经由两个 $45^\circ$ 放置的偏转镜调整,再经由一个聚光透镜,穿过真空腔壁上的窗口,聚焦在样品表面。同时系统配置了 He-Ne 激光作为准直激光。实验时,将被测样品放置于真空腔内的测试样品台上,将真空室抽至高真空,即可对光学薄膜在真空环境中抗激光损伤性能进行测试。所用损伤测试方法为 1-on-1,激光输出波长为 1064 nm,模式 TEM<sub>00</sub>,能量不稳定性为小于 $\pm 5\%$ ,脉冲宽度为 12 ns,测试角度为 $0^\circ$ ,激光光斑直径为 410  $\mu\text{m}$ 。损伤阈值定义为零几率损伤阈值,判断标准为在 Nomarski 显微镜放大 100 倍观察时膜层发生明显变化即认为损伤<sup>[14]</sup>。

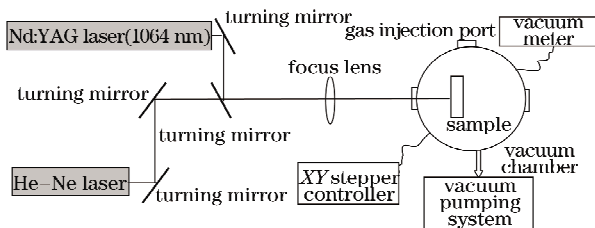


图1 真空损伤测试装置示意图

Fig.1 Scheme of the laser damage test in vacuum

### 2.2 样品的制备

实验用所有样品均为电子束蒸发方式制备的增透膜,其膜系结构为 G/H2.5L/air,其中 H 代表 ZrO<sub>2</sub>,L 代表 SiO<sub>2</sub>,G 为 K9 玻璃基底。光谱曲线如图 2 所示。为保证测量结果的准确性,所有测试样品均在相同的工艺下制备,并在同一样品的不同区域下测量。

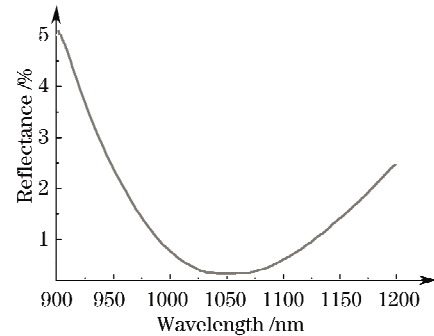


图2 电子束蒸发方式制备的 1064 nm 增透膜光谱曲线

Fig.2 Spectral of anti-reflection films prepared by e-beam deposition at wavelength of 1064 nm

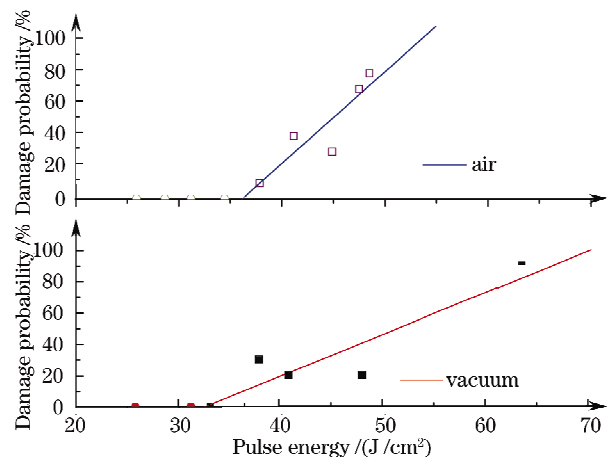


图3 大气和真空环境下增透膜 0% 激光损伤测试结果

Fig.3 Testing results of ARF 0% damage probability under air and vacuum

## 3 实验结果

### 3.1 损伤阈值

激光损伤测试的实验结果示于图 3~6。从图 3~6 中可以看出,增透膜在真空度为 $7 \times 10^{-3}$  Pa 环境下的损伤阈值明显低于大气环境下的损伤阈值。在真空环境下存入氧气、氮气、氦气后损伤阈值都得到不同程度的提高,但存入的气体不同对阈值的影响结果不完全相同。在真空环境下存入少量氧气后,此时气压从真空度 $7 \times 10^{-3}$  Pa 变为 $3 \times 10^{-2}$  Pa,增透膜的损伤阈值从真空条件下的 $24.6 \text{ J/cm}^2$  增大到 $32.6 \text{ J/cm}^2$ ,但当氧气压为 1 Pa 时,损伤阈值又降低到真空条件下的损伤阈值。而存入

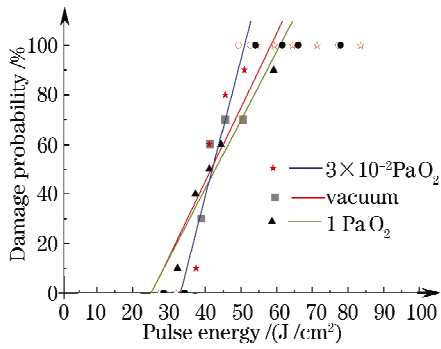


图 4 氧气和真空环境下增透膜 0% 激光损伤测试结果  
Fig. 4 Testing results of ARF 0% damage probability under vacuum and oxygen

氮气后,在不同氮气压下,增透膜的损伤阈值都比真空环境下的阈值高,且氮气压越高,阈值越高。在真空环境下

存入氮气以后,损伤阈值也比真空环境下的损伤阈值高,但损伤阈值受氮气压的变化很小,在不同的氮气压下损伤阈值几乎保持不变。

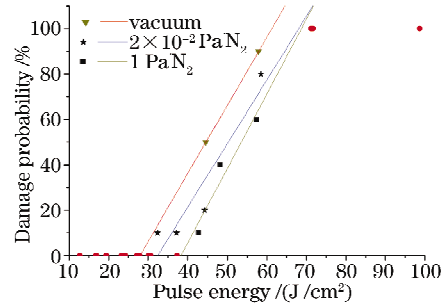


图 5 氮气和真空环境下增透膜 0% 激光损伤测试结果  
Fig. 5 Testing results of ARF 0% damage probability under vacuum and nitrogen

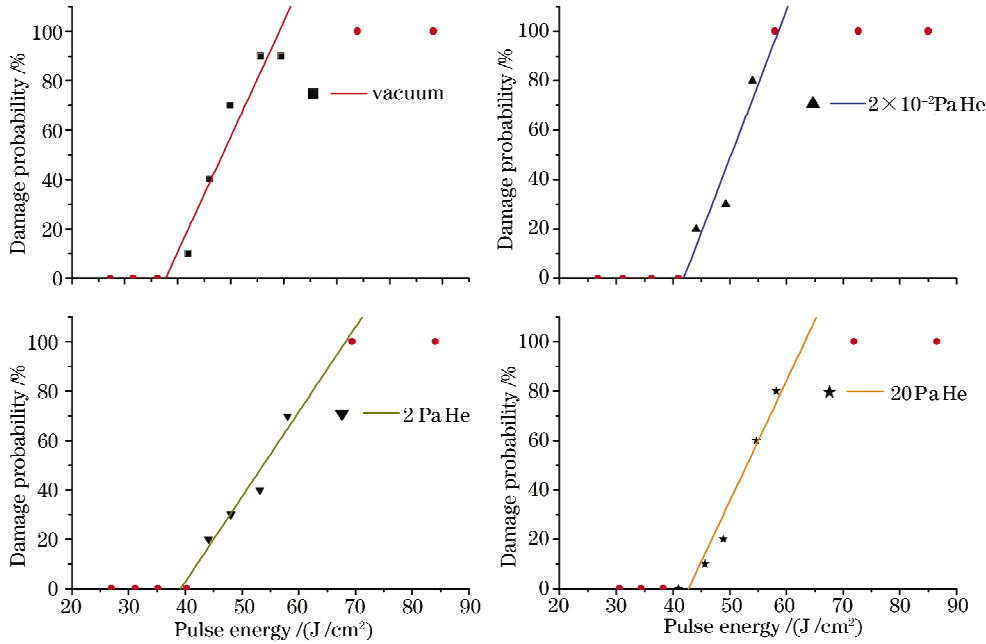


图 6 氮气和真空环境下增透膜 0% 激光损伤测试结果  
Fig. 6 Testing results of ARF 0% damage probability under vacuum and helium

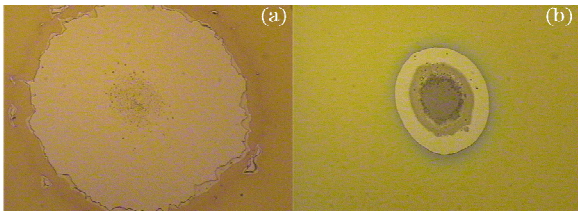


图 7 在相同的激光能量下大气(a)和真空(b)下增透膜的损伤形貌

Fig. 7 Damage morphologies of ARF irradiated by the same laser energy under air (a) and vacuum (b)

### 3.2 损伤形貌

在相同的激光能量不同环境下增透膜的损伤形

貌示于图 7~10。由图 7 可以看出在相同的激光能流辐照下,真空中的损伤破斑明显小于大气中的损伤破斑,且破斑形貌差别较大。大气中损伤破斑形状不规则,通常在破斑周围产生晕区,且主要是表面膜层损伤。真空中破斑形状规则,损伤区与未损伤区界限分明,不仅表面膜层受损,损伤区域深入到表面以下膜层。当在真空环境下存入少量氧气后,此时氧气压为  $3 \times 10^{-2}$  Pa,增透膜的损伤形貌与真空环境下保持一致,当氧气压为 1 Pa 时,损伤的破斑区域增大,损伤形貌接近于大气环境下的破斑形貌,如图 8 所示。由图 9 可以看出,在氮气环境下,当氮

气压为  $2 \times 10^{-2}$  Pa 时,破斑形貌与真空环境下的破斑形貌相同,当氮气压为 1 Pa 时,破斑形貌介于真空和大气环境下的破斑形貌之间,主要为表面膜层破坏,类似于大气环境下的损伤情况,损伤区与未损

伤区界限分明,又类似于真空环境下的损伤情况。在氮气环境下,在不同的真空度下,增透膜的损伤形貌都有与真空环境下相似的破斑形貌,如图 10 所示。

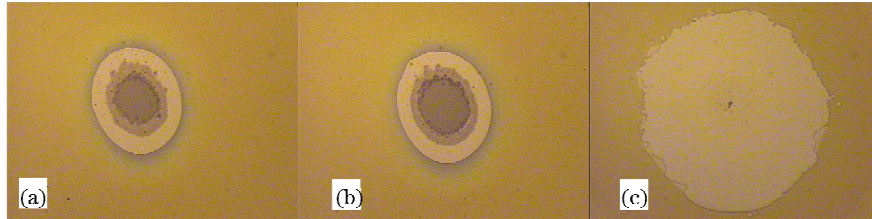


图 8 在相同的激光能量下真空和氧气环境下增透膜的损伤形貌。(a)真空;(b) $3 \times 10^{-2}$  Pa 氧气;(c)1 Pa 氧气  
Fig. 8 Damage morphologies of ARF irradiated by the same laser energy under vacuum and oxygen. (a) Vacuum;  
(b)  $3 \times 10^{-2}$  Pa  $O_2$ ; (C) 1Pa  $O_2$



图 9 在相同的激光能量下真空和氮气环境下增透膜的损伤形貌。(a)真空;(b) $2 \times 10^{-2}$  Pa 的氮气;(c)1 Pa 的氮气  
Fig. 9 Damage morphologies of ARF irradiated by the same laser energy under vacuum and nitrogen. (a) Vacuum;  
(b)  $3 \times 10^{-2}$  Pa  $N_2$ ; (c) 1Pa  $N_2$

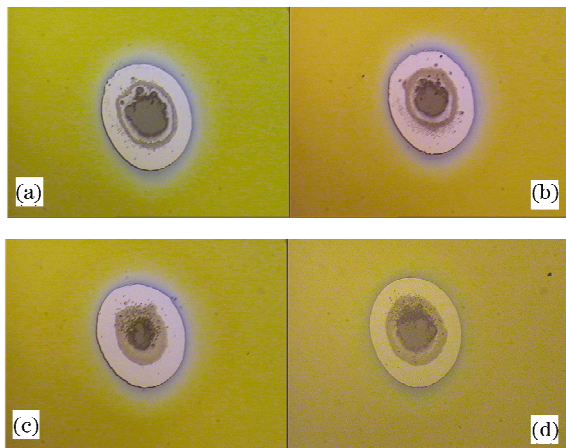


图 10 在相同的激光能量下真空和氦气环境下增透膜的损伤形貌。(a)真空;(b) $2 \times 10^{-2}$  Pa 氦气;(c) 2 Pa 氦气;(d)大于 20 Pa 氦气

Fig. 10 Damage morphologies of ARF irradiated by the same laser energy under vacuum and helium. (a) Vacuum; (b)  $2 \times 10^{-2}$  Pa He; (c) 2Pa He; (d)  $>20$ Pa He

#### 4 分析与讨论

真空环境是一种低压、低氧的环境,与大气环境有显著差别,因此与大气环境下薄膜的激光损伤相

比,真空环境中薄膜的损伤表现出新的特征。真空环境下低的气压使得薄膜在激光损伤过程中耦合了更多的等离子体冲击波,因此真空环境下薄膜损伤阈值低于大气环境下薄膜的损伤阈值。当存入氧气、氮气、氦气后,真空室中的气压增大,抑制了薄膜在激光损伤过程中等离子体冲击波的耦合,所以损伤阈值得到提高。但当存入的氧气量较多时,损伤阈值又降低到真空环境下的阈值。这是因为较多的氧气使得膜层在激光辐照过程中发生氧化,损伤阈值降低。同时可以发现存入氮气和氧气的气压较高时,薄膜的损伤形貌类似于大气环境下的损伤形貌,这与大气环境中氮气与氧气是主要成分相一致。在真空环境下存入氮气以后损伤阈值提高,但损伤阈值与损伤形貌的变化似乎与氮气的气压没有关系。所以可以推断气体热传导差异不是真空环境与大气环境下损伤差异的原因,因为氮气是一种高热传导气体,在不同气压的氮气环境中,损伤阈值以及损伤形貌没有明显差异。另外存入氧气、氮气和氦气后损伤行为的差异说明气体的特性与气体分子质量会影响真空损伤,因此在相同的气压下为提高薄膜的真空损伤阈值应该采用化学性质不活泼且气体分子质量较大的气体。

## 5 结 论

利用 1-on-1 损伤测试方法,测试了真空和空气、氧气、氮气、氦气环境下增透膜的激光损伤阈值和损伤形貌。结果表明,真空环境下的损伤阈值明显低于大气环境下的损伤阈值,真空环境下的破斑形貌也与大气环境下的破斑形貌有显著差异。在真空环境下存入少量的氧气、氮气和氦气后薄膜的损伤阈值都得到提高,但存入气体的种类及气压不同,损伤阈值与破斑形貌也不尽相同。气体热传导差异不是真空环境与空气环境下损伤差异的原因。由于在真空环境中气压较低,薄膜在损伤过程中耦合了更多的等离子体冲击波,从而导致了薄膜在真空环境下损伤阈值的降低。

### 参 考 文 献

- 1 Li Dawei, Zhao Yuan'an, He Hongbo *et al.*. Exponential fitting of laser damage threshold and analysis of testing errors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 273~275  
李大伟,赵元安,贺洪波等. 光学元件激光损伤阈值的指数拟合法以及测试误差分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 273~275
- 2 Xu Cheng, Dong Hongcheng, Xiao Qiling *et al.*. Optical properties and laser-induced damage threshold of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films deposited by different methods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1595~1599  
许程,董洪成,肖祁陵等. 不同方法制备的 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜光学性能和激光损伤阈值的对比分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1595~1599
- 3 A. K. Burnham M. J. Runkel S. G. Demos *et al.*. Effect of vacuum on the occurrence of UV-induced surface photoluminescence, transmission loss, and catastrophic surface damage, photonics for space environments VII [C]. *SPIE*, 2000, **4134**: 243~252
- 4 L. Jensen, M. Jupe, H. Madebach *et al.*. Damage threshold investigations of high power laser optics under atmospheric and vacuum conditions [C]. *SPIE*, 2007, **6403**: 64030u
- 5 W. Riede, P. Allenspacher, L. Jensen *et al.*. Analysis of the air-vacuum effect in dielectric coatings [C]. *SPIE*, 2008, **7132**: 71320F
- 6 C. Scurlock. A phenomenological study of the effect of trace contaminants on lifetime reduction and laser-induced damage for optics [C]. *SPIE*, 2005, **5647**: 82~93
- 7 M. A. Norton, C. J. Stdz, E. E. Donohue *et al.*. Impact of contaminants on the laser damage threshold of 1 $\omega$  HR coatings [C]. *SPIE*, 2005, **5991**: 59910O
- 8 G. Guéhenneux, Ph. Bouchut, M. Veillerot *et al.*. Impact of outgassing organic contamination on laser-induced damage threshold of optics. Effect of laser conditioning [C]. *SPIE*, 2005, **5991**: 59910G
- 9 John S. Canham. Molecular contamination damage prevention lessons learned from vacuum laser operation [C]. *SPIE*, 2005, **5991**: 59910E
- 10 W. Riede, P. Allenspacher, H. Schröder *et al.*. Laser-induced hydrocarbon contamination in vacuum [C]. *SPIE*, 2005, **5991**: 59910II
- 11 Yun Cui, Hua Yu, Yuan'an Zhao *et al.*. Impact of organic contamination in vacuum laser-induced damage threshold of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> dielectric mirrors [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11): 680~682
- 12 Paul Allenspacher, W. Riede, Denny Wernham *et al.*. Vacuum laser damage test bench [C]. *SPIE*, 2005, **5991**: 599128
- 13 P. Allenspacher, W. Riede. Laser qualification testing of space optics [C]. *SPIE*, 2007, **6403**: 640307
- 14 Determination of laser induced damage threshold of optical surfaces-Part 1: 1-on-1 test [S]. ISO 11254-1, 2000