

文章编号: 1002-1582(2001)06-0507-02

HfO₂/SiO₂ 高反膜、增透膜及偏振膜的 1 064 nm 激光损伤特性

胡建平, 邱服民, 马平

(成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘 要: 高反膜、增透膜和偏振膜是 Nd:YAG 激光器中的关键薄膜元件, 其抗激光损伤能力直接影响到激光器的输出能量和功率。由于优异的物理化学性能, 高功率 Nd:YAG 激光器的光学薄膜一般采用 HfO₂/SiO₂ 膜料组合镀制, 因而用此膜料镀制的光学薄膜的激光损伤特性是薄膜工作者重点关注的问题。对光学中心 APS1504 镀膜机镀制的 HfO₂/SiO₂ 高反膜、增透膜和偏振膜等开展了 1 064 nm 的激光损伤实验研究, 用 200 倍的 Normaski 显微镜详细分析了高反、增透和偏振膜的激光损伤图貌, 发现对于脉宽为 10 ns 波长的 1 064 nm 的激光而言, 高反膜基本表现为孔洞和等离子体烧蚀疤痕, 孔洞是由薄膜中的节瘤(nodular)缺陷的激光损伤引起的, 损伤的能流密度较低, 为薄膜的零损伤阈值密度。疤痕为薄膜的激光等离子体烧蚀引起的, 尺寸大小与激光能量密度成近似正比。增透膜一般为双面镀, 分前后膜堆两种情况, 前膜堆表现为孔洞和疤痕, 与高反膜相似; 后膜堆为孔洞型的小圆麻点聚积, 麻点处的薄膜完全剥落, 没有疤痕等烧蚀痕迹, 是激光在基片之间形成的驻波电场损毁, 损伤阈值比前膜堆低 1.5 倍, 决定着增透膜的损伤阈值。偏振膜的低能量密度损伤与增透膜后膜堆相似, 表现为孔洞型小麻点聚积, 损伤处未见疤痕等烧蚀痕迹。对薄膜小尺度损伤抗激光进一步损毁能力来说, 高反膜较强, 增透膜和偏振膜几乎没有, 后续激光脉冲的打击会造成薄膜灾难性损毁。

关 键 词: 高反膜; 增透膜; 偏振膜; 激光损伤

中图分类号: TN24

文献标识码: A

1 064 nm pulse laser damage of hafnia-silica multilayer coatings

HU Jian-ping, QIU Fu-ming, MA Ping

(Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041, China)

Abstract: Hafnia-silica multilayer mirror, antireflector and polarizer are deposited by e-beam evaporation onto BK7 glass substrates. They are tested with a single 1 064 nm pulse laser with 10 ns duration, the morphologies of the laser-induced damage is characterized by Normaski and atomic force microscope(AFM). The damage morphologies show: a) the laser damage is mainly pit and scald for HR coating, they seem to be result from the formation of plasmas on the surface, for AR coating and polarizer, the damage pictures are found to many pits without trace of plasmas; b) for AR coating, there is obviously different for characterization and threshold of laser damage between front and back coat stack, the damage morphology of front stack is similar to HR, and the back stack is many pits. In addition, the damage threshold of back stack is 1.5 times lower than that of front stack, so determines the AR laser damage threshold.

Key words: laser damage; hafnia/silica; multilayer; coating

1 引 言

光学薄膜,特别是高反、增透和偏振膜在高功率 Nd:YAG 激光器光学系统中起着产生和传输激光的重要作用,是激光器的关键组成部分。光学薄膜的激光损伤阈值直接影响到激光器能量的输出大小,是限制激光器提高输出功率的瓶颈因素之一^[1]。

光学薄膜的抗激光损伤能力对高功率激光器来说是一个重要的技术指标,其大小直接影响激光器设计建造的成败。研究表明,光学薄膜的抗激光损伤能力与多种因素有关,主要包括镀膜材料的选定,膜系设计和镀膜参数的优化等,其中膜料的选取最为关键。实验显示, HfO₂/SiO₂ 膜料由于优异的物理化学性能,目前最适合镀制 Nd:YAG 强激光薄膜,因而弄清 HfO₂/SiO₂

光学薄膜的激光损伤特性,对提高薄膜激光损伤阈值,设计 Nd:YAG 激光器,特别是以亚损伤能流密度运转的激光器极为重要^[2~10]。

本文针对光学中心镀制的 HfO₂/SiO₂ 高反、增透和偏振膜,用脉宽 10 ns 的 1 064 nm 激光进行了损伤实验,详细讨论和分析了薄膜的激光损伤形态和图貌,比较了高反、增透和偏振膜激光损伤特性的差异,按国际标准 ISO11254 测量了它们的激光损伤阈值。

2 实验条件和准备

2.1 薄膜样品

镀膜基片为 φ40 mm × 5 mm 的 K9 光学玻璃,基片的表面粗糙度由美国 RSTPLUS 粗糙度仪测量,平均均方根粗糙度值

• 收稿日期: 2001-05-16

作者简介: 胡建平(1964-),男,四川省成都精密光学工程研究中心副研究员,主要从事光学薄膜激光损伤及预处理方面的研究。

小于 1.0 nm, 基片镀膜前用酒精和丙酮清洗干净。

实验用的高反膜、增透膜和偏振膜采用 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 膜堆, 用真空电子束蒸镀而成。高反膜为 23 层规整膜堆, 膜系为 $\text{G}/(\text{HL})^{11}\text{H2L}/\text{A}$, 其中 G 表示基片, H 表示 HfO_2 高折射率材料, L 表示低折射率材料, A 表示空气, 最外层加镀了 SiO_2 半波覆盖层。增透膜也在基片和膜堆之间加镀 SiO_2 半波覆盖层, 以减小基片磨制缺陷对增透膜堆的影响。以上高反膜、增透膜和偏振膜的中心波长为 1064 nm, 偏振片的使用角度为 57° 。

2.2 损伤实验系统和方法

薄膜激光损伤阈值测量系统是由单纵膜 Nd:YAG 调 Q 激光器、He-Ne 准直光源、分光光楔、3 m 聚焦凸镜、可移动样品平台及能量计和 CCD 光束分析仪组成。测试激光由 Nd:YAG 调 Q 脉冲激光器输出, 激光输出模式为 TE_{00} , 波长为 1064 nm, 脉宽(FWHM)为 10 ns, 最大脉冲能量为 1.5 J, 能量稳定性为 $\pm 5\%$ 、重复频率分别为 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz。样品平台可在 X-Y-Z 三个方向移动, 能保证测试光斑在薄膜不同区域进行激光损伤测试。激光能量用美国的 EM500 大能量探头能量计测量, 测量精度小于 $\pm 1\%$, 测试点光斑大小和有效面积用 CCD 光束分析仪测量, 测得光斑平均等效面积为 1.045 mm^2 。

薄膜的激光损伤实验采用单次激光脉冲照射样品薄膜, 即 1-ON-1 方式, 损伤阈值按国际标准 ISO11254 所要求的规范测量, 测量结果为零损伤概率激光损伤阈值。另外, 采用不连续多次激光脉冲照射薄膜同一点区域, 研究薄膜的轻度激光损伤抗激光进一步损毁能力。

3 实验结果与分析

3.1 薄膜的激光损伤图貌

3.1.1 高反膜

$\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜的脉宽 10 ns 波长 1064 nm 激光 1-ON-1 的典型损伤图貌如图 1 所示。低能量密度的激光损伤主要表现为单个孔洞, 是薄膜节瘤缺陷吸收热量后产生等离子体喷溅而形成的薄膜损伤, 孔洞附近小区域范围存在等离子体烧伤所形成的疤痕, 中等能量密度的激光损伤表现为疤痕, 是薄膜受激光能量快速加热后表面膜料形成等离子体汽化形成的。对于高能量密度的激光脉冲来说, 薄膜表面等离子体汽化更严重, 可明显看出表面膜层已汽化剥离。

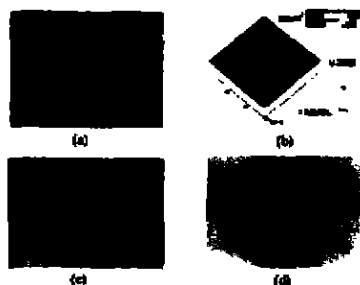


Fig.1 The typical morphologies of laser damage of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ HR coating Picture (a)(c) (d) taken by Normaski and (b) by atomic force microscope

3.1.2 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 增透膜、偏振膜

$\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 增透膜、偏振膜的典型的 1064 nm 激光损伤显微图貌如图 2 所示。增透膜的损伤分为前后增透膜堆损伤, 损伤形态不太相同。一般增透膜基片两面均镀增透膜堆。在激光传输中, 由于光束穿过前后膜堆和基片, 因而激光损伤分前后膜堆损伤和基片损伤。对增透膜前膜堆来说, 薄膜损伤与高反膜相同, 主要表现为疤痕和孔洞等, 由激光烧伤效应引起。后膜堆的激光损伤表现为多个小孔洞聚集, 损伤点附近没有疤痕等烧伤痕迹, 最低激光损伤能量密度比前膜堆低 1.5 倍左右。从损

伤形貌可以看出, 增透膜后膜堆的激光损伤为典型的激光驻波电场损伤。由于激光电场在基片之间形成驻波电场, 而基片表面不是绝对光滑, 有许多起伏不平的微小突起, 引起驻波场在突起处增大, 造成薄膜局部应力突变, 形成多个小孔洞聚集的损伤形态。

偏振片是在基片一面镀制偏振膜堆, 其激光损伤形态与增透膜的后膜堆相似, 薄膜表面表现为小孔洞聚集, 没有疤痕等烧伤痕迹, 表现为典型的驻波场损伤。偏振片的无膜基片在偏振膜堆损伤时, 不会发生激光损伤。

3.2 薄膜的激光损伤阈值

薄膜的激光损伤阈值测量按 1-ON-1 方式进行, 以国际标



Fig.2 The typical laser damage morphologies of (a) AR front coating; (b) AR back coating; (c) polarizer

准 ISO11254 为规范, 测量零损伤阈值。薄膜的激光损伤以在 100 倍 Normaski 显微镜下观察没有变化为准。高反膜、增透膜和偏振膜的激光损伤概率曲线如图 3 所示, 可以看出零损伤概率即损伤阈值在高反膜时最高, 偏振膜次之, 增透膜最低。

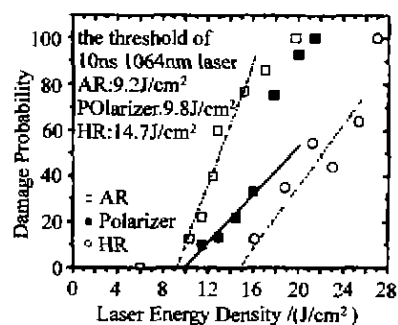


Fig.3 The laser damage probability of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ coatings

由于激光薄膜是一种重复使用的光学元器件, 因而抗激光脉冲连续打击能力是激光薄膜的关键技术指标之一。实验发现, 薄膜一般在 10 次不连续激光脉冲



Fig.4 The typical damage morphologies of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ coating on 10 pulse shots (a)HR; (b)AR

的打击下, 不发生损伤, 或小尺寸轻度损伤, 不会发生进一步严重损毁。薄膜对后续激光脉冲的打击不会发生灾难性的损毁。本实验采用 10 次不连续激光脉冲测试高反膜、增透膜和偏振膜的激光损伤特性, 激光损伤图貌如图 4 所示。高反膜最为优异, 而增透和偏振膜由于激光能量全部或大部分通过薄膜, 能量累积效应明显, 易发生灾难性薄膜损毁。

高反膜主要反射激光, 激光能量主要分布在薄膜最外几层; 增透膜的激光能量几乎全部穿过薄膜; 偏振膜作用在 57° 角, 反射激光的 S 光, 透射激光的 P 光, 只有部分激光能量穿过薄膜。薄膜不同的光学性能导致了激光损伤特性的差异和损伤阈值大小的不同。

4 结 论

通过激光损伤实验, 详细分析和讨论了 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜、增透膜和偏振膜的 1064 nm 波长 10 ns 脉宽的激光损伤阈值和激光损伤特性, 得出以下几点结论:

(下转第 511 页)

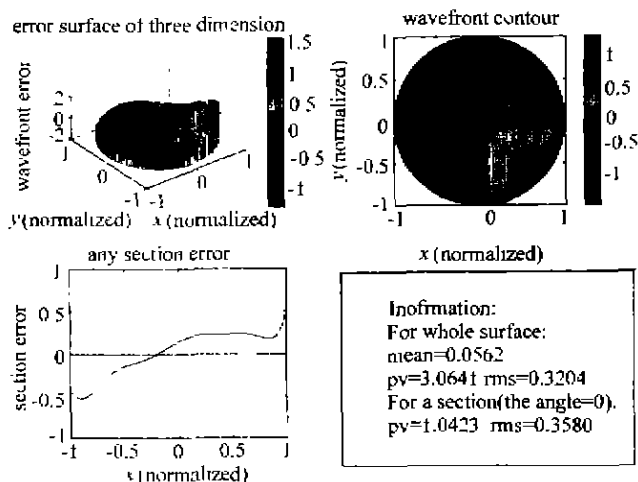


Fig.4 Software simulation

圆心与 Y 轴平行的一个截面,其 $pv = 1.0423 \mu\text{m}$, $rms = 0.2580 \mu\text{m}$ 。图 5 是经过去倾斜、离焦、慧差后的图像,其 $pv = -0.0116 \mu\text{m}$, $rms = 0.2300 \mu\text{m}$,截面的 $pv = 0.4244 \mu\text{m}$, $rms = 0.0672 \mu\text{m}$ 。

7 结束语

本文给出了一种基于 zernike 多项式拟合的精磨面形检验方法,并验证了该软件的可行性。尽管此法不如干涉仪直观,由于仪器的精度和测量时修正等客观因素的影响,不如干涉仪精度高,但是它对于大口径的非球面精磨来说,在干涉方法不能使用的环境下却是一种行之有效的办法。

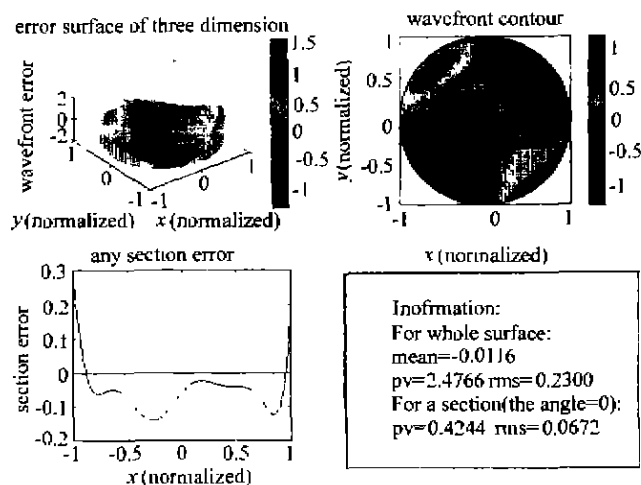


Fig.5 Remove tilt, defocus, coma

参考文献:

- [1] 余景池,张学军,等. 计算机控制非球面加工精磨阶段的检测技术[J]. 光学技术,1998,(5):38~40.
- [2] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 合肥:合肥工业大学出版社(第三版),1997.
- [3] R E 帕克斯斯;揭德译. 测量模板误差的消除[J]. 光学技术,1982,(4).
- [4] Daniel Malacara. Optical Shop Testing [M]. John Wiley & Sons Inc, 1978.
- [5] 韦春龙,陈明仪,王之江. 运用泽尼克多项式的相位去包裹算法[J]. 光学学报,1998,(7): 912~915
- [6] 普里亚耶夫著;杨力译;潘君华校. 光学非球面检验[M]. 北京:科学出版社,1982.
- [7] 高俊斌. MATLAB5.0 语言与程序设计[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1998.

(上接第 508 页)

(1) 对于激光损伤阈值来说,高反膜最高,增透膜次之,增透膜最低。

(2) 对于薄膜 10 ns 的 1064 nm 激光损伤来说,Normaski 显微镜的显微图显示,高反膜主要表现为疤痕和孔洞等,激光烧伤痕迹明显;增透膜和偏振膜的低能量密度损伤主要表现为许多小孔洞聚集,没有疤痕和孔洞等激光烧伤痕迹,是由激光驻波电场引起的薄膜应力突变造成的。

(3) 增透膜为两面镀膜系,前膜堆和后膜堆的激光损伤形态和损伤阈值不大相同。前膜堆的损伤图貌与高反膜相似,表现为疤痕和孔洞;后膜堆表现为许多小孔洞聚集,其最低激光损伤能量密度比前膜堆低 1.5 倍左右,因而决定了增透膜的激光损伤阈值。

(4) 薄膜或薄膜小尺寸轻度损伤抗连续激光脉冲损伤能力,在高反膜时最强,偏振膜次之,增透膜最弱。

参考文献:

- [1] Kozlowski M R, Thomas J M, Campbell J H, Rainer F. High-power-optical Coatings for a Mega-Joule Class ICF Laser in Thin Films for Optical Systems [J]. SPIE, 1992, 1782, 105~119.
- [2] Robert Chow, Steve Falabella, Gary E Loomis, Frank Rainer, Christopher J Stolz, Mark R Kozlowski. Reactive evaporation of low-defect

density hafnia [J]. applied optics, 1993, 32(28):5567~5573.

- [3] Sheehan L, Kozlowski M, Stolz C, Genn F, Rinkel M, Schwartz S, Hue J. Large Area Damage Testing of Optics [P]. UCRL-JC-122006, 1996.
- [4] 付雄鹰,孔明东,胡建平. 波长 1064 nm 脉冲激光高阈值反射膜的研制[J]. 强激光与离子束, 1999, 11(4): 413~417.
- [5] Genn F Y, Stolz C J, Renter J, et al. Effect of electric field distribution on the morphologies of laser induced in hafnia-silica multilayer polarizer [P]. UCRL-JC-124873, 1997.
- [6] 胡建平,邱眼民,付雄鹰,曾勋. SiO_2 半波覆盖层对 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜激光损伤的影响[J]. 强激光与离子束, 2001, 13(2).
- [7] 胡建平,马孜,李伟,等. 氧化物薄膜抗 1064 nm 脉冲激光损伤的特性研究[J]. 光学学报, 2000, 20(2): 262~266.
- [8] Wolfe C R, Kozlowski M R, Campbell J H, Rainer F. laser conditioning of optical thin films in Laser-Induced Damage in Optical Materials [J]. SPIE, 1990, 1438:376~390.
- [9] Kozlowski M R, Wolfe C R, Staggs M C, Campbell J H. large-area laser conditioning of dielectric thin film mirrors, in Laser-Induced Damage in Optical Materials [J]. SPIE, 1990, 1438:376~390.
- [10] Sheehan L, Kozlowski M R, Rainer F, Staggs M C. Large-area conditioning of optics for high-power laser systems in Laser-Induced Damage in Optical Materials [J]. SPIE, 1994, 2114:559~568.