

单晶硅反射镜激光能量吸收系数与衬底表面质量的关联*

田野^{1,2}, 戴一帆^{1,2}, 石峰^{1,2}, 彭小强^{1,2}, 韩凯³, 朱志武^{1,2}, 万稳^{1,2}

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073;

2. 超精密加工技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073;

3. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:高能激光系统中,单晶硅基底反射镜的能量吸收系数是影响系统性能的关键指标。衬底加工质量对镀膜后元件激光能量吸收系数影响显著。通过测试不同衬底粗糙度、划痕密度的单晶硅反射元件,分析衬底表面典型加工特征(粗糙度、划痕)对激光能量吸收系数的影响规律,认为粗糙度与吸收系数正相关,粗糙度均方根从0.668nm降低至0.345nm会使吸收系数降低28.0%。少量划痕对吸收系数的直接影响并不明显,吸收系数均值变化在3.1%以内。但表面划痕会诱发激光损伤,划痕密度较大时会引起后续能量吸收持续增大,辐照400s后,吸收系数较辐照100s时增大18.3%。

关键词:单晶硅;激光能量吸收系数;衬底表面质量

中图分类号:TN95 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2015)06-026-04

Correlation between substrate surface quality and laser energy absorption rate for mono-crystalline silicon reflector

TIAN Ye^{1,2}, DAI Yifan^{1,2}, SHI Feng^{1,2}, PENG Xiaoqiang^{1,2}, HAN Kai³, ZHU Zhiwu^{1,2}, WAN Wen^{1,2}

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Hunan Key Laboratory of Ultra-precision Machining Technology, Changsha 410073, China;

3. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In high energy laser systems, the energy absorption rate (EAR) of mono-crystalline silicon reflector is a vital index in the term of elements quality. The substrate process quality affects the EAR of coated optics dramatically. The surface roughness and scratch density for a series of silicon optics were measured. Based on the result, the co-influence and relationship between surface characteristic and EAR were analyzed. It is indicated that, surface roughness level is positively correlated to EAR and decides the global average rate of the entire surface. When the root-mean-square of roughness falls from 0.668nm to 0.345nm, the EAR decreases by 28.0%. In contrast, few scratches do not distinctly raise the EAR, the fluctuation is less than 3.1%. However, the surface scratch may generate laser-induced damage. Furthermore, when the scratch density is large enough, the subsequent EAR will grow constantly, for example, the amplitude reaches 18.3% after the 400s irradiation, compared with 100s irradiation.

Key words: mono-crystalline silicon; laser energy absorption rate; substrate surface quality

中红外激光已经广泛应用于国计民生的各个领域。早在20世纪80年代,激光输出功率就达到了兆瓦量级,目前高能中红外激光在各个领域有着重要的应用与广阔的前景^[1-3]。但是,随着该项技术的进步以及激光能量的不断提升,系统内部元件自身的失效问题,已经愈发突出地制约了该项技术的发展^[2-5]。在 高能激光的辐照下,系统元件(膜层与衬底)吸收部分能量发生失效:轻者发生热变形,产生波前畸变,影响光路远

场聚焦,降低光束质量;重者表面会发生激光诱导损伤(Laser-induced Damage, LID),如爆轰坑或烧蚀损伤,喷溅材料破坏下游元件,致使元件破坏性损伤,甚至破坏整个系统^[5-7]。为了研究这一问题,定义元件吸收的能量与总能量的比值为吸收系数(Energy Absorption Rate, EAR),EAR已成为评价高能激光元件性能的一项重要指标^[6,8]。

根据设计值,对于镀高反膜的单晶硅基底中红外反射镜,工作波段的激光能量仅有不到200×

* 收稿日期:2015-08-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91023042)

作者简介:田野(1989—),男,河南焦作人,博士研究生,E-mail:tianyecomeon@sina.cn;

戴一帆(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:dylf@nudt.edu.cn

10^{-6} 能传播到衬底表面,同时单晶硅材料在该波段透过率也在 99.98% 以上^[9]。理想状况下,EAR 值应小于 2×10^{-6} ,但实测结果远大于此。研究普遍认为这是由于镀膜、衬底加工工艺中引入的缺陷吸收了大量能量,导致 EAR 提高^[9-12]。

由于绝大部分能量仅在膜层中传播,在镀膜工艺较差的情况下,镀膜质量(缺陷的种类与密度)对吸收系数影响较衬底更大。目前国内外学者针对中红外高反膜系的激光损伤阈值与能量吸收系数研究主要集中在膜系沉积过程产生的缺陷上^[5-6, 11-13]。但对膜系的衬底,也就是元件基体本身对 EAR 的影响,尚缺乏系统深入的研究。仅有文献指出镀膜质量与衬底粗糙度相关^[9, 14-15],需达到均方根(Root Mean Square, RMS)优于 0.8nm 这一工程指标^[9, 11]。而随着近年镀膜工艺提升,衬底本身对元件 EAR 的影响,其作用规律亟须进一步研究明确。

1 衬底表面制备与检测

为了分析元件能量吸收系数与衬底表面粗糙度、疵病状况的关联关系,制备了一组小尺寸单晶硅反射镜(3 件 $\Phi 30$ 和 2 件 $\Phi 50$)。对全部 5 个衬底完成相同的前级抛光后,分别在其表面制备了不同粗糙度形貌,不同密度的划痕疵病,并测试记录,见表 1。衬底粗糙度使用 Zygo Newview 700 白光干涉仪测量。暗场划痕分布照片使用自研的结构性缺陷检测仪测量,如图 1 所示。

表 1 衬底表面粗糙度与划痕状态

Tab.1 Surface roughness and scratch situation on substrates

编号	粗糙度 RMS 值/nm	划痕密度/ (条数/cm ²)
30-1	0.345	—
30-2	1.207	1
30-3	1.090	5~10
50-1	0.668	—
50-2	0.733	1~2

为保证镀膜工艺的一致性,所有衬底同一批次完成镀膜。

2 吸收系数测试理论与结果

2.1 吸收系数测试理论

激光总能量可由实测激光功率与辐照时间积分得到,但元件吸收能量无法直接测量,需要间接测量元件温升再计算得出。经过简化元件的热扩散模

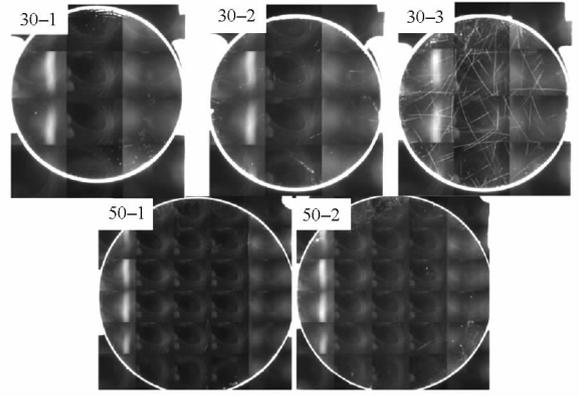


图 1 各衬底表面划痕损伤暗场照片

Fig.1 Observation of scratch distribution on substrates in darkroom

型,激光能量的吸收系数理论值可由式(1)表示。

$$Q = \frac{E_{\text{deposition}}}{E} \quad (1)$$

其中: Q 为吸收系数; E 为激光辐照总能量; $E_{\text{deposition}}$ 为沉积在元件上的能量,计算方法如式(2)所示。

$$E_{\text{deposition}} = \Delta TCm \quad (2)$$

其中: ΔT 为元件温升,通过贴在元件背面的三个温度传感器测得; C 为单晶硅比热容; m 为元件质量,通过高精度电子秤测得。

激光辐照的总能量为:

$$E = \int P(t) dt \quad (3)$$

其中, $P(\cdot)$ 为实际测得的激光功率, t 为激光辐照时间。

将式(2)、式(3)代入式(1)即可得到:

$$Q = \frac{\Delta TCm}{\int P(t) dt} \quad (4)$$

2.2 吸收系数测试结果

激光能量吸收系数测试在国防科学技术大学光电科学与工程学院完成,光斑为矩形,尺寸约 $8\text{mm} \times 15\text{mm}$,测试参数见表 2。经过测试及计算,5 片单晶硅元件镀膜后的能量吸收系数见表 3。

表 2 吸收系数测试参数

Tab.2 Test parameters of EAR

参数	水平
入射角度	22.5°反射
辐照时间	100s
测量次数	4
数据采集来源	温度传感器
激光功率	5kW ~ 6kW(以实测为准)

表 3 吸收系数测试结果
Tab.3 Test results of EAR

编号	吸收系数				均值
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	
30-1	58.86	59.06	52.79	52.67	55.84
30-2	70.19	68.88	62.21	69.09	67.59
30-3	71.12	69.91	78.63	84.17	75.96
50-1	80.79	86.15	69.38	73.93	77.56
50-2	79.98	86.03	63.16	71.74	75.23

3 衬底质量与吸收系数的关联分析

3.1 粗糙度对吸收系数的影响规律

对比 30-1 与 50-1, 两个元件衬底表面均没有划痕, 30-1 的粗糙度 RMS 为 0.345nm, 50-1 的为 0.668nm。吸收系数方面, 粗糙度更好的 30-1 要明显优于 50-1, 同时 50-1 的吸收系数波动更为剧烈。这是由于衬底较差的表面粗糙度不仅会恶化膜层的粗糙度, 还会影响衬底-膜层的界面状态, 影响膜层沉积, 最终降低镀膜质量与工艺均匀性, 提高吸收系数与波动幅度, 如图 2 所示。

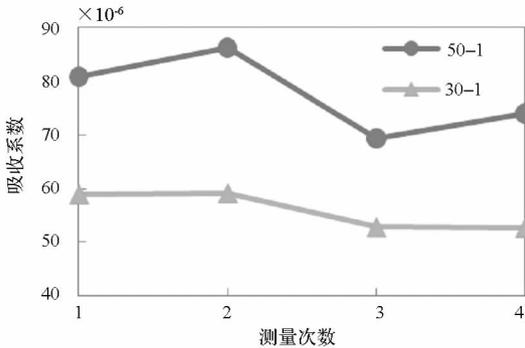


图 2 吸收系数对比

Fig. 2 Absorption rate comparison

3.2 划痕密度对吸收系数的影响规律

对比 50-1 与 50-2, 两个元件粗糙度相近, 50-1 无划痕, 50-2 存在少量划痕, 但划痕情况的不同并未反映在吸收系数上: 50-2 的吸收系数无论幅值还是波动趋势都与 50-1 十分相近, 差别在 10% 以内, 如图 3 所示。这是由于 50-2 划痕密度小, 测试时, 8mm × 15mm 的光斑未能辐照到划痕区域上, 划痕并未能实际影响到吸收系数。

因此, 相对于粗糙度与收系数显而易见的正关联关系, 划痕则需要耦合其密度, 折算成有效挡光面积(辐照区域内, 划痕的挡光面积)后, 再进行考虑。在实际工程中, 如果不是全口径辐照, 在辐照区域以外存在划痕是可以接受的, 利于成本

控制。

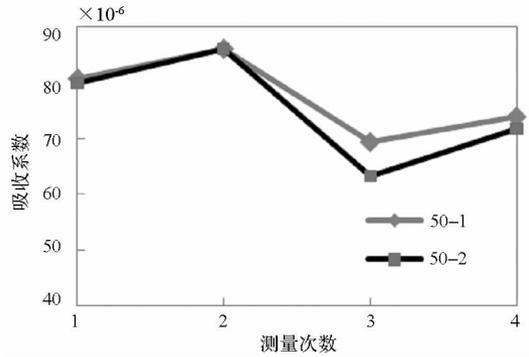


图 3 吸收系数对比

Fig. 3 Absorption rate comparison

3.3 划痕对吸收系数的影响规律

对比 30-2 与 30-3, 两个元件粗糙度相同, 30-3 划痕密度更大, 中心辐照区域内有划痕分布, 即 30-3 表面划痕带来的有效挡光面积大于 30-2。根据 3.2 节的分析, 30-3 的吸收系数也应明显大于 30-2。

然而两者的吸收系数在前两次测试中几乎完全相同, 仅相差 1×10^{-6} 。但从第 3 次测试开始, 两元件吸收系数开始分化: 30-2 吸收系数下降了 9.7%, 而 30-3 吸收系数则增大了 12.5%。

在随后的第 4 次测试中, 30-2 吸收系数小幅反弹, 与最初两次测试的幅值相当; 反观 30-3 则继续增大了 7%, 达到所有测试结果的峰值 84.17×10^{-6} 。

从变化趋势上来看, 30-3 吸收系数从第 3 次测试开始有明显上升趋势, 最终经过 400s 辐照后, 吸收系数比辐照 100s 时增大了 18.3%; 而 30-2 仅小幅波动, 第 3、第 4 次测试后, 吸收系数均值甚至有所降低, 曲线呈向下趋势, 如图 4 所示。

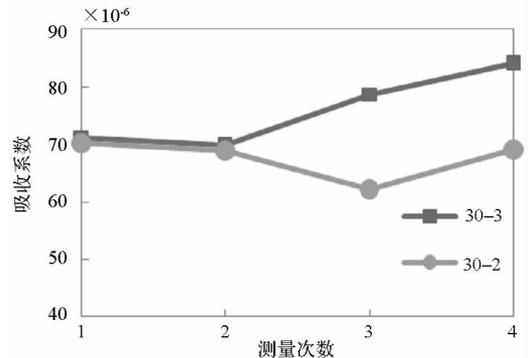


图 4 吸收系数对比

Fig. 4 Absorption rate comparison

划痕对吸收系数的作用规律与粗糙度不同。粗糙度是整个表面微观起伏的统计值, 实时影响

着辐照区域内吸收系数的整体平均水平。而划痕所引起的挡光面积要远小于正常区域,所以尽管划痕区域吸收的激光在功率上要大于正常区域,但在能量上,占总体吸收量的比例就很小了。

另一方面,由于划痕处膜层的紊乱沉积和缺陷结构,降低了划痕处激光负载能力,再加上相对高的局部功率,极易发生场破坏或热破坏,产生激光诱导损伤。损伤一旦产生,则会在辐照下以指数形式扩展生长^[5-6]。而损伤区域更易发生光场调制、聚集能量,吸收系数会较其他区域更高。因此,损伤一旦发生,能量吸收系数也会随损伤扩展而迅速上升。

综上,粗糙度、划痕对吸收系数的关联关系是:粗糙度与吸收系数直接正相关,在每次激光辐照中,吸收系数的基础水平都被粗糙度所制约;划痕有效挡光面积则影响着吸收系数的增长与激光损伤情况,划痕挡光面积越大越可能诱发激光损伤,使吸收系数愈发快速地增大。对照图4中的数据,由于粗糙度水平相当,前两次的测量并未体现出30-2和30-3的不同。随后测试中吸收系数变化趋势的分歧则是由于划痕挡光面积更大的30-3发生了激光损伤,吸收系数逐渐增大,而30-2未发生损伤,吸收系数仍与初始值相当。

4 结论

根据实验结果与分析,吸收系数与衬底表面质量相关,且粗糙度与划痕对吸收系数的影响规律也各有不同:①粗糙度与吸收系数正相关,显著并直接地影响着元件吸收系数的整体平均水平。②划痕直接吸收的总能量相对于整体吸收能量是很小的,但是由于相对高的能量沉积密度,极易发生激光损伤,后续辐照将使损伤增长,显著提高吸收系数。③划痕对吸收系数的影响需要考虑划痕尺寸与密度,换算成有效挡光面积。划痕形态相同时,划痕面积决定其吸收的总能量,同时划痕会诱发激光损伤,使吸收系数出现持续增大的演变趋势。考虑其可能会带来的后续破坏及最终的灾难性结果,在加工中应优先控制表面划痕。

参考文献 (References)

[1] High energy laser systems test facility (HELSTF) enhanced laser and range operations [R]. USA: Army Space and Missile Defense Command Redstone Arsenal AI, ADA437754, 2005.

[2] 杜少军. 高能激光器及其发射系统的热变形研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2001.

DU Shaojun. Research of thermal deformation in high energy laser and emission system [D]. Changsha: National

University of Defense Technology, 2001. (in Chinese)

[3] 陈金宝, 刘泽金, 蒋志平, 等. 非稳腔DF激光窗口热效应及其对远场光斑的影响 [J]. 强激光与粒子束, 1994, 6(2): 243-249.

CHEN Jinbao, LIU Zejin, JIANG Zhiping, et al. The resonator DF laser window thermal effect and the affect on far-field spots [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1994, 6(2): 243-249. (in Chinese)

[4] 刘文广, 饶鹏, 华卫红. 非均匀激光辐照下硅镜热变形对光束传输特性的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(10): 1615-1619.

LIU Wenguang, RAO Peng, HUA Weihong. Non-uniform silicon mirror thermal deformation under laser irradiation effects on beam transmission characteristics [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(10): 1615-1619. (in Chinese)

[5] Zhang Y P, Zhang Y D. Defect study on several fluoride coatings [C]//Proceedings of SPIE, 2009, 7283: 72832Q.

[6] Zhang Y P, Xu H, Ling N, et al. Defect study on infrared thin film of 3.8 μm [C]//Proceedings of SPIE, 2006, 6149: 614912.

[7] 朱志武. 短脉冲激光对可见光 CCD 及滤光片组件的损伤效应研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.

ZHU Zhiwu. Short pulse laser to visible light CCD and the damage effect of the filter components [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)

[8] 王英剑, 胡海洋, 李庆国, 等. 高反射硅镜弱吸收的研究 [J]. 中国激光, 2001, 28(10): 937-940.

WANG Yingjian, HU Haiyang, LI Qingguo, et al. Study of weak absorption of the thin film coated on the Si plates [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(10): 937-940. (in Chinese)

[9] 张淑敏. 清洗技术和平滑层对极紫外多层膜基底粗糙度的影响及表面表征技术研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.

ZHANG Shumin. Cleaning technology and the smooth layer of extreme ultraviolet multilayer membrane basal characterization technology research and the influence of surface roughness [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)

[10] Van Den Boogaard A J R, Louis E, Zoethout E, et al. Smoothing properties of single and multilayer coatings, a method to smoothen substrates [C]//Proceedings of SPIE, 2008, 692: 69210R-1.

[11] 王颖. 中红外激光薄膜的研究与制备 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.

WANG Ying. The infrared laser film research and preparation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)

[12] 张耀平, 许鸿, 凌宁, 等. 红外激光薄膜表面缺陷研究 [J]. 应用激光, 2005, 25(3): 165-168.

ZHANG Yaoping, XU Hong, LING Ning, et al. Infrared laser film surface defect research [J]. Applied Laser, 2005, 25(3): 165-168. (in Chinese)

[13] Mirkarimi P B, Spiller E, Baker S L, et al. A silicon-based, sequential coat-and-etch process to fabricate nearly perfect substrate surfaces [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2006, 6(6): 28-35.

[14] 宋晓岚. 纳米 SiO₂ 浆料中半导体硅片的化学机械抛光及其应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.

SONG Xiaolan. Nano SiO₂ in semiconductor wafer chemical mechanical polishing paste and its application research [D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese)

[15] Wang Y, Zhang Y G, Chen W L, et al. Optical properties and residual stress of YbF₃ thin films deposited at different temperatures [J]. Applied Optics, 2008, 47(13): C319-23.