

doi: 10.3788/gzxb20164507.0731001

用于 355 nm 紫外激光器的消偏振二向色镜

庄秋慧^{1,2}, 刘国军¹, 付秀华¹, 马孜³, 王三强⁴

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 重庆理工大学 电子信息与自动化学院, 重庆 400050)

(3 西南技术物理研究所, 成都 610000)

(4 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要:采用离子束辅助电子束成膜,用双重膜厚监控方法监控各膜层厚度,制备了 45°入射、808 nm 高反、1064 nm 高透的消偏振二向色镜,并用于全固态 355nm 激光器.将部分薄膜样品在 250℃进行退火处理后,用 Lambda950 分光光度计测试该样品的光谱性能;用表面热透镜技术测量退火前后该样品的弱吸收值;用激光阈值损伤装置测试该样品在 1064 nm 调 Q 激光下的损伤阈值;用 NIKON 显微镜观察样品在不同激光能量辐照下的破斑形貌.实验结果表明:波长为 808 nm 和 1 064 nm 时,薄膜透射率分别为 0.04% 和 99.6%,符合设计要求,满足全固态 355nm 紫外激光器系统所要求的光学性能指标;退火后的弱吸收值较退火前有所降低;在激光作用下薄膜产生微破坏喷出,说明膜层不会向灾难性破坏演变.

关键词:薄膜光学; 紫外激光器; 激光损伤; 消偏振; 光学性质; 膜厚

中图分类号: O484.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0731001-5

Depolarised Dichroic Mirror for the 355nm Ultraviolet Laser System

ZHUANG Qiu-hui^{1,2}, LIU Guo-jun¹, FU Xiu-hua¹, MA Zi³, WANG San-qiang⁴

(1 Changchun University of Science and Technology, the School of Electro-Optical Engineering, Changchun 130022, China)

(2 Chongqing University of Technology Electronic Information and Automation, Chongqing 400054, China)

(3 Xinan Technology Physical Research Institute, Chengdu 610000, China)

(4 State Grid Chongqing Electric Power CO. Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

Abstract: By using the ion beam assisted deposition to evaporate the materials and utilizing the double film thickness monitoring method to control the thickness of each layer, a depolarised dichroic mirror with the incidence angle of 45°, the spectrum 808nm reflected and 1064nm transmitted was prepared, which was used in an all solid state 355 nm laser. The partial thin film samples were annealed at 250℃, then the transmittance was measured with a Lambda 950 spectrophotometer; the weak absorption value of coatings was measured by a surface thermal lensing technique before and after annealing; the laser-induced damage threshold was tested by a 1 064 nm Q-switch pulsed laser; the morphology of the samples was observed by NIKON microscope under the different laser energy. The experimental results show that, the transmittances of the films are T_{1064} is 99.6%, T_{808} is 0.04%, which meet the design requirements, and the optical performance of the film can meet the requirements of the all solid state 355nm ultraviolet laser system; the weak absorption value is decreased after annealing; Micro destruction of the film is emitted under the action of laser, which proves that the film will not evolve to a catastrophic failure.

Key words: Thin film optics; Ultraviolet lasers; Laser induced damage ; Depolarization; Optical

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 51275551, 51505053)和重庆市基础科学与前沿技术研究专项(No. cstc2015jcyjA40022)资助

第一作者: 庄秋慧(1979-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为激光薄膜. Email: zqh@cqut.edu.cn

通讯作者: 刘国军(1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光技术. Email: gjliu626@126.com

收稿日期: 2016-01-08; 录用日期: 2016-05-06

properties; Film thickness

OCIS Codes: 310.0310; 140.0140; 160.0160

0 引言

全固态 355 nm 紫外激光器具有体积小、效率高、寿命长、光束质量好、单光子能量大、分辨率高、稳定性好及工作物质无毒等优点,在半导体、聚合物、陶瓷及铜质合金等材料的加工方面具有明显的优势和广阔的应用前景^[1]. 由于全固态 355 nm 紫外激光器泵浦波长与输出波长不同,且泵浦方式、腔型结构及使用的激光材料种类繁多,因此对激光薄膜光学性能提出了更高、更新的要求,所使用的光学薄膜不再局限于传统意义上对单一激光波长的高反射、高透射,而是需满足对多个波段的高反射率和高透射率要求,常规的解析设计法往往无法达到设计要求^[2].

在激光系统中,为了实现像旋转、不同光路叠加以及激光腔折叠等,通过光学元件的光需要倾斜入射. 光在倾斜入射时,由于膜层对两个偏振状态的有效折射率不同,引起反射率、透射率和相位移动都不同,因此在反射光和透射光中会引入偏振效应. 偏振效应造成分色片两个偏振方向 P 光和 S 光的反射率和透射率发生分离,使 P 光的透过率和反射率远低于 S 光,平均值比正入射低^[1]. 基于应用需求,国内外先后开展了分色片的消偏振技术研究: 1976 年 Thelen^[3] 在 Baumeister^[4-5] 设计思想的基础上,利用 1/4 膜堆给出了可见光谱范围内的消偏振分束设计^[3,5]; Sterke 等^[7-9] 在 Thelen 研究的基础上,依据 K/4 膜厚采用 3 种材料来实现消偏振分光膜系的设计. Gilo 应用布儒斯特条件采用 3 种不同折射率的材料来实现消偏振膜系设计^[10-11]. 以浙江大学顾培夫为代表的研究人员^[12] 于 1999 年设计并制备了用于 450~750 nm 波段的 45° 角入射的金属-介质消偏振分光镜,它相比于全介质消偏振分光镜具有更为优良的特性;中国科学院上海技术物理研究所马小凤等^[13-14] 于 2007 年针对海洋遥感的应用要求,设计制备了宽光谱消偏振分色片,对薄膜器件的偏振能量特性进行了一定程度控制.

但目前为止,消偏振设计大多采用三种折射率材料,还存在消偏振带宽较小且难于镀制等问题. 本文研究了用于全固态 355 nm 紫外激光系统的二向色镜,用于分离 808 nm、1 064 nm 的泵浦光和输出激光. 由于此二向色镜是 45° 倾斜使用的,不可避免地会存在偏振效应,因此,基于传统的长波通截止滤光片为初始膜系进行消偏振设计,采用离子束辅助电子束成膜及双重膜厚监控方法,用两种不同折射率材料设计出偏振分离小的减反射膜.

1 膜系设计

355 nm 紫外激光器的二向色镜的设计要求为:入

射角 45°, $T_{808} < 0.05\%$, $T_{1064} > 99.5\%$.

采用传统长波通截止滤光片为初始膜系来设计此二向色镜膜. 其初始结构为 $G/(H/2 L H/2)^N/A$. 其中: G 代表 JGS₁ 熔石英光学玻璃, A 代表空气入射介质, N 是重复周期数, H 表示 ZrO₂ 高折射率材料, L 表示 SiO₂ 低折射率材料. 在此基础上用膜系设计软件 Essential Macleod 对薄膜进行优化设计,设计曲线如图 1. 由图 1 可知, $T_{808} = 0.03\%$, $T_{1064} = 99.8\%$, 膜系最终采用 45 层设计,用 2 种不同折射率材料达到了消偏振的目的.

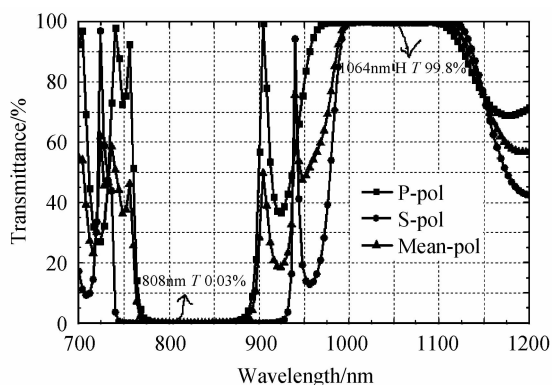


图 1 波长分离膜入射角 45°, 808 nm R, 1 064 nm H T 设计曲线

Fig. 1 Design curve of AOI45 808 nm R, 1 064 nm H T wavelength separation coating

2 样品制备

样品制备前, JGS₁ 熔石英光学玻璃基底在超净台上用石油醚清洗干净. 样品的制备在西南技术物理研究所的日本光驰 OTFC1300 镀膜机上进行, 采用离子束辅助电子束成膜. 为改善光电极值法极值点判读准确度低的缺陷, 结合石英晶振监控具有良好线性度的优点, 采用光电极值和石英晶振双重膜厚监控法, 以此提高薄膜的制备准确度. 其中 H 和 L 都为上海安研公司生产的纯度标定为 99.99% 的高折射率材料 ZrO₂ 和低折射率材料 SiO₂. 参考波长 $\lambda_0 = 900$ nm, 本底真空为 1.46×10^{-3} Pa, 薄膜的沉积温度为 200 °C, 将部分样品置于空气中 250 °C 温度下退火 3 h.

3 实验结果及分析

3.1 薄膜光谱特性

采用美国 Perkin-Elmer 公司生产的的 Lamda950 分光光度计(仪器透射率测量准确度 $\pm 0.05\%$) 测试薄膜光谱透射率, 对制备的样品在 45° 入射角进行测量, 测量波长范围 300~1 200 nm, 波长分辨率 1 nm, 图 2 为入射角 45° 时, 经 250 °C 退火后薄膜透过率光谱曲

线,图中 $T_{808} = 0.04\%$, $T_{1064} = 99.6\%$ 。从图 2 可以看出,薄膜的透射率符合设计要求: $T_{808} < 0.05\%$, $T_{1064} > 99.5\%$,满足 355 nm 全固态紫外激光器系统要求的光学性能指标。

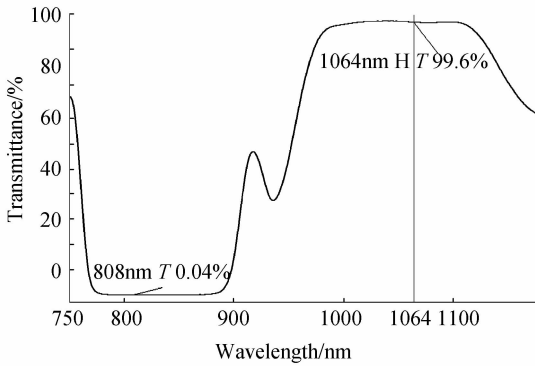


图 2 入射角 45°,808 nm R, 1 064 nm H T 透射率测试曲线
Fig. 2 The transmittance test results of 808 nm H R/1 064 nm H T (AOI45°) coating

3.2 薄膜弱吸收测量

测量薄膜弱吸收对于研究损伤机理、预估损伤阈值、改进薄膜工艺具有重要指导意义。薄膜弱吸收测量

表 1 样品的弱吸收大小

Table 1 Weak absorption of the samples

| Samples | Values of measured dots/($\times 10^{-6}$) | | | | | | | | | | Average/($\times 10^{-6}$) |
|--------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------|
| As deposited | 465 | 521 | 301 | 278 | 441 | 507 | 495 | 432 | 406 | 638 | 489 |
| Annealed | 310 | 262 | 355 | 243 | 192 | 276 | 322 | 215 | 183 | 492 | 285 |

膜,当氧的含量偏低时,薄膜呈现较强的吸收能力。作为高价氧化物的氧化锆在电子束高温蒸发时很容易因失氧生成亚氧化物,达不到化学计量比,而在空气中样品经过退火后,进一步的氧化重组氧空位,使薄膜缺陷减少,从而降低了薄膜的弱吸收^[9]。

3.3 薄膜损伤阈值特性

激光损伤阈值的测试采用 1-on-1 的测试方法进

行。在样品上每点激光只作用一次。符合 ISO 11254-1.1 的测试标准^[7]。薄膜损伤阈值测量装置由光电调 Q 的振荡级和光隔离放大级组成的 Nd:YAG 激光器、聚焦凸透镜、分光镜、二维可移动样品平台、CCD 和能量计组成,最后整套系统用电脑进行控制。其测量装置如图 4。

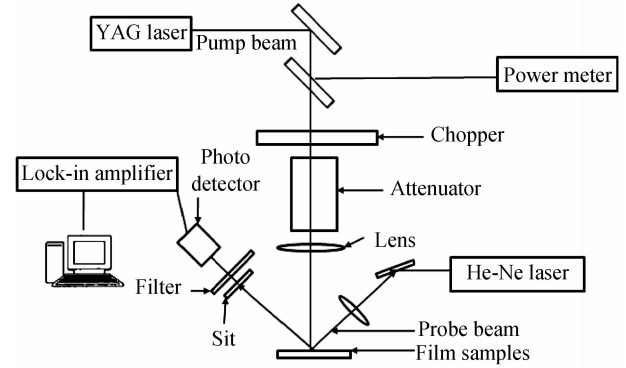


图 3 表面热透镜弱吸收测量试验装置

Fig. 3 Experimental layout of the surface thermal lensing technique

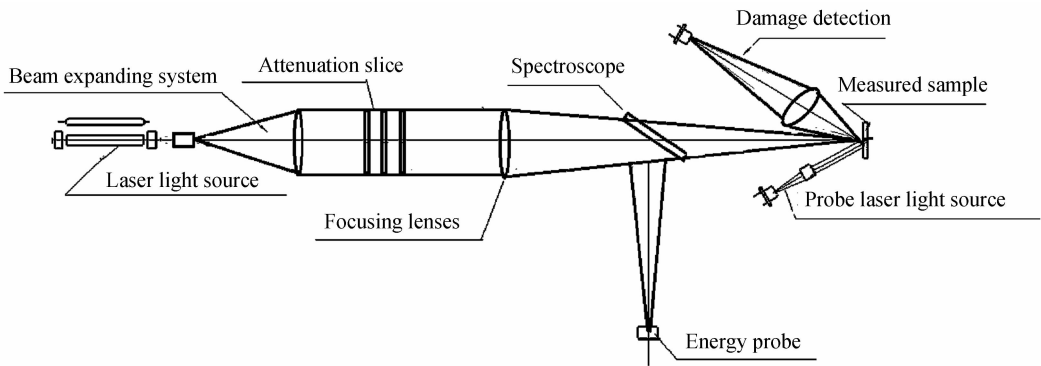


图 4 测量激光损伤阈值的实验装置示意图

Fig. 4 Experimental setup for LIOT measurement

测量装置中,激光波长 1 064 nm,脉冲重复频率 1 Hz/10 Hz,靶平面上的有效光束半径 0.3 mm,脉宽 13 ns。每个试样上测试点数目 100;测试点的排列 10 \times 10;测试点之间的最小距离 1.5 mm;试样直径 30 mm;

通过这 10 个能量级、100 个测试点的测试,可以绘制出以激光能量为横轴、损伤几率为纵轴的关系曲线,用数学回归法计算得到激光能量与损伤几率的线性关系直线,该直线与能量轴的交点所代表的激光辐射能量损

伤几率为 0 的最大能量值,由此可以计算出损伤阈值.

退火前后激光损伤阈值测量结果如图 5.

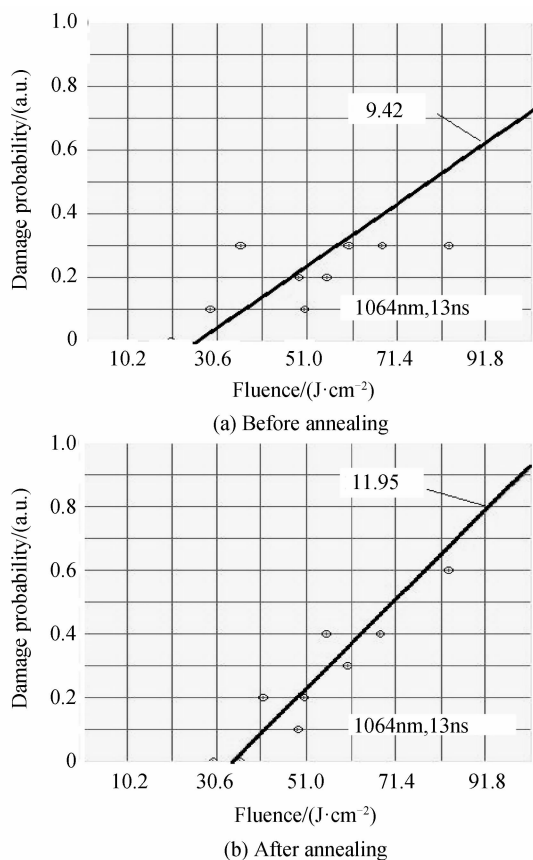


图 5 退火前后激光损伤阈值测量结果

Fig. 5 Laser damage threshold measurement results before and after annealing

由图 5 可以看出,退火前后样品基频(1 064 nm, 13 ns)激光损伤阈值分别 9.42 J/cm^2 和 11.95 J/cm^2 . 图上显示的数据是能量密度,换算成功率密度为 725 mW/cm^2 和 919 mW/cm^2 . 退火后样品明显提高了在基频处的损伤阈值.这与样品在退火后弱吸收降低的结果相一致.因此,光学薄膜的吸收是影响薄膜光学性能和激光损伤阈值的重要因素.但是,薄膜弱吸收并非导致激光阈值损伤的唯一原因.薄膜缺陷可能是导致薄膜损伤的另一个因素.

3.4 薄膜破斑形貌分析

样品的激光破坏形貌采用 NIKON 显微镜进行观察,不同激光能量下的破斑形貌如图 6.

仔细观察可以发现,无论破斑大小,在其中心都有一个小的吸收中心.这是由于基底与膜的界面处往往是膜系结构中薄弱环节,缺陷点对辐照激光能量的吸收而导致薄膜的剥落.利物莫尔实验室的研究认为,这种多层膜的损伤一般是节瘤引起的,增加辐照激光能量密度后,如图 6(b),破斑表现出的是一种熔融状态,比起低能量密度下的损伤并无明显变化,仅仅是在横向上的范围有所增加,并且也没有过多的标志杂质元

素的裂痕出现.这进一步说明,薄膜在激光作用下产生微破坏喷出,膜层不会向灾难性破坏演变^[10].

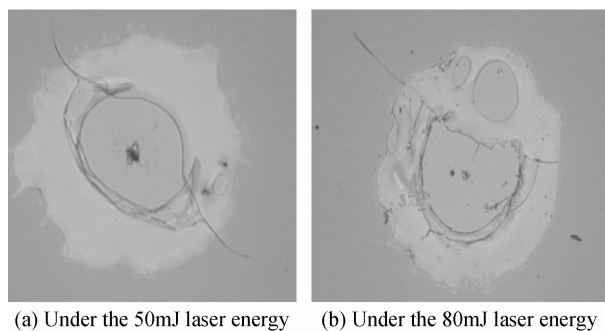


图 6 不同激光能量下的破斑形貌

Fig. 6 The morphology under the different laser energy

4 结论

本文采用离子束辅助电子束成膜及光学比例法监控技术制备了 45° 入射、808 nm 高反、1 064 nm 高透的消偏振二向色镜,用于全固态 355 nm 激光器中.对薄膜样品进行了光谱性能测试.薄膜的透射率 $T_{808} = 0.05\%$, $T_{1064} = 99.6\%$, 满足 $T_{808} < 0.05\%$, $T_{1064} > 99.5\%$ 的设计要求,满足 355 nm 全固态紫外激光器系统要求的光学性能指标.经 250°C 退火后,并没有影响薄膜的整体性能,表明样品的热稳定性较好.对所制备样品进行退火前后的弱吸收值测量,分别为 489 ppm 和 285 ppm.对样品进行了激光损伤阈值测量,退火前后样品的基频(1 064 nm, 13 ns)抗激光损伤阈值分别为 9.42 J/cm^2 和 11.95 J/cm^2 .弱吸收值退火后较退火前有所降低,从而提高了薄膜的抗激光损伤阈值.最后,对不同激光能量下的破斑形貌进行观察,进一步验证了在激光作用下薄膜产生微破坏喷出,膜层不会向灾难性破坏演变.

参考文献

- [1] LI Yu-yao, WANG Fei, JIAO Zheng-chao, *et al.* High efficient LD end-pumped QCW355 nm laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(3): 332-336.
李玉瑶,王菲,焦正超,等.高效率 LD 端面抽运连续 355 nm 激光器[J]. *发光学报*, 2014, **35**(3): 332-336.
- [2] ZHAO Shang-hong, WU Ji-li, LI Yong-jun, *et al.* Present status and developing trends of satellite laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 092801.
赵尚弘,吴继礼,李勇军,等.卫星激光通信现状与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(9): 092801.
- [3] HA M, Thin-film optical filter [M]. Tucson: Thin Film Center Inc., 1999, 348-391.
- [4] ZHAN Mei-qiong, HUANG Jian-bing, SHANG Shu-zhen, *et al.* Effects of vacuum annealing on the performance of 355 nm $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ high reflectance coatings[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(11): 1389-1392.
占美琼,黄建兵,尚淑珍,等.真空退火对 355 nm $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgF}_2$ 高反射薄膜性能的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(11): 1389-1392.

- [5] YU Hua, CUI Yun, SHEN Yan-ming, *et al.* Deposition rate's effects on the properties of LaF_3 films prepared by thermal boat evaporation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(11): 1557-1561.
余华, 崔云, 申雁鸣, 等. 沉积速率对热舟蒸发 LaF_3 薄膜性能的影响[J]. 中国激光, 2007, **34**(11): 1557-1561.
- [6] THELEN A. Avoidance or enhancement of polarization in multilayers[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1980, **70**(1): 118-121.
- [7] YUAN Jing-mei, TANG Zhao-sheng, QI Hong-ji, *et al.* Optical constants and properties of several kinds of ultraviolet thin film materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 984-988.
袁景梅, 汤兆胜, 齐红基, 等. 几种紫外薄膜材料的光学常量和性能分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(8): 984-988.
- [8] LIU M, LEE C, KANEKO M, *et al.* Influence of ion assistance on LaF_3 films deposited by molybdenum boat evaporation[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(15): 2865-2869.
- [9] DI Guo-qing. Surface morphology and optical properties of Ta_2O_5 films prepared by radio frequency sputtering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(3): 038101.
狄国庆. 溅射制备 Ta_2O_5 薄膜的表面形貌与光学特性[J]. 物理学报, 2011, **60**(3): 038101.
- [10] ZHAO Ling, WU Xiao-ye, GU Yong-qiang, *et al.* Measuring the absorptance of deep ultraviolet fluoride coatings with laser calorimetry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(08): 0807001
赵灵, 武潇野, 谷勇强, 等. 激光量热法测量深紫外氟化物薄膜吸收[J]. 中国激光, 2014, **41**(08): 0807001.
- [11] XU Cheng, DONG Hong-cheng, XIAO Qi-ling, *et al.* Optical properties and laser-induced damage threshold of Ta_2O_5 films deposited by different methods[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(10): 1595-1599.
许程, 董洪成, 肖祁陵, 等. 不同方法制备的 Ta_2O_5 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.
- [12] GU Pei-fu, CHEN Wei-bin, LIU Xu. Design of depolarization thin film cutoff filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 274-278.
顾培夫, 陈卫斌, 刘旭. 薄膜截止滤光片的消偏振设计[J]. 光学学报, 2005, **25**(2): 274-278.
- [13] MA Xiao-feng. Control of polarization and processing technology study of broadband dichroic filter for ocean remote sensing[D]. Shanghai Institute of Technical Physics, 2007, 87-94.
马小凤. 海洋遥感用宽光谱分色片的偏振控制与工艺研究[D]. 上海技术物理研究所, 2007, 87-94.
- [14] TAN Tian-ya, HUANG Jian-bing, ZHAN Mei-qiong, *et al.* Design of 1 064 nm, 532 nm, 355 nm frequency-tripled antireflection coating for LBO[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1327-1332.
谭天亚, 黄建兵, 占美琼, 等. LBO 晶体上 1 064 nm, 532 nm, 355 nm 三倍频增透膜的设计[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1327-1332.
- [15] HUANG Zu-xin, ZHAO Jian-lin, HU Xiao-yang, *et al.* Parameters optimized for optical thin film weak absorption testing set-up[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(9): 1789-1783.
黄祖鑫, 赵建林, 胡晓阳, 等. 光学薄膜弱吸收测试装置参量优化[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(9): 1789-1783.
- [16] LI Kai-peng, WANG Duo-shu, LI Chen, *et al.* Study on optical thin film parameters measurement method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(3): 1048-1052.
李凯朋, 王多书, 李晨, 等. 光学薄膜参量测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(3): 1048-1052.