

# 卫星激光防护薄膜窗口的设计与制备技术研究

姜玉刚<sup>1,2</sup>, 刘华松<sup>1,2\*</sup>, 王利栓<sup>1,2</sup>, 陈丹<sup>1,2</sup>, 李士达<sup>1,2</sup>, 季一勤<sup>1,2</sup>

(1. 天津市航技术物理研究所, 天津市薄膜光学重点实验室, 天津 300308;

2. 光电材料智能表面织构技术联合实验室, 天津 300308)

**摘要:**当前反卫星激光武器发展迅猛, 迫切需要研究和发展卫星的激光防护技术, 以增强卫星在空间的生存与防护能力。本文采用可见光-近红外透明和中波吸收的玻璃基底与线性激光防护薄膜相结合的设计方法, 在玻璃基板一面设计分光膜, 实现 1.315  $\mu\text{m}$  波长的反射和 0.5 ~ 0.8  $\mu\text{m}$ 、1.55  $\mu\text{m}$  波段的增透, 在玻璃基板另一面设计双波段减反射膜, 实现 0.5 ~ 0.8  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  波段的增透。采用离子束溅射沉积技术, 实现了激光防护窗口薄膜的制备, 在 0.5 ~ 0.8  $\mu\text{m}$  的平均透过率大于 96%, 1.55  $\mu\text{m}$  的透过率大于 98%, 1.315  $\mu\text{m}$  的透过率小于 0.1%, 在 2.7  $\mu\text{m}$  的透过率为 30%, 在 3.8  $\mu\text{m}$  的透过率为 1.1%。实验结果表明, 该方法实现了可见光-近红外-中红外波段激光防护窗口的制备, 对于卫星平台防护激光武器具有重要作用。

**关键词:**激光武器; 离子束溅射技术; 防护薄膜; 透过率; 反射率

**中图分类号:** TB34; O434 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20191204.0804

## Design and preparation technology of laser protective film window of satellite

JIANG Yu-Gang<sup>1,2</sup>, LIU Hua-Song<sup>1,2\*</sup>, WANG Li-Shuan<sup>1,2</sup>, CHEN Dan<sup>1,2</sup>, LI Shi-Da<sup>1,2</sup>, JI Yi-Qin<sup>1,2</sup>

(1. *Tianjin Key Laboratory of Optical Thin Film, Tianjin Jinhang*

*Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China;*

2. *Joint Laboratory of Optoelectronic Materials and Intelligent Surface Structures, Tianjin 300308, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: liuhuasong@hotmail.com*

**Abstract:** In view of the current development of anti-satellite laser weapons, it is urgent to study and develop laser protection technology of satellites to enhance their survival and protection capabilities in space. In this paper, a glass substrate with transparency in the visible to near infrared wavelengths and absorption in middle infrared wavelengths was chosen, and a linear laser protective film was designed on its two sides. A beam splitter was designed on one side of the substrate and could achieve high reflectivity at a 1.315  $\mu\text{m}$  wavelength and antireflection in 0.5 ~ 0.8  $\mu\text{m}$  and 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength. Dual-band antireflection film was designed on

收稿日期: 2018-08-31; 修订日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61705165, No. 61775167, No. 61235011); 天津市自然科学基金 (No. 18JCZDJC37900)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61705165, No. 61775167, No. 61235011);  
Natural Science Foundation of Tianjin Province (No. 18JCZDJC37900)

the other side of the glass substrate and could achieve antireflection in  $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$  and  $1.55 \mu\text{m}$  wavelengths. Using ion beam sputtering deposition technology, a laser protective film window was prepared, achieving the transmittance greater than 96% at  $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ , greater than 98% at  $1.55 \mu\text{m}$ , less than 0.1% at  $1.315 \mu\text{m}$ , 30% at  $2.7 \mu\text{m}$  and 1.1% at  $3.8 \mu\text{m}$ . The experimental results show that this method is effective in the preparation of laser protection windows in the near-visible mid-infrared band and is very important in the protection of the satellite platforms from laser weapons.

**Key words:** laser weapon; ion beam sputtering technique; protective film; transmittance; reflectance

## 1 引言

随着高能激光武器的快速发展,激光武器迅速成为一种具有直接杀伤力的新式武器。当前反卫星激光武器的发展,迫切需要研究和发展卫星的激光防护技术,尤其是对卫星的光学遥感系统(特别是光电探测器)进行抗激光致盲或损伤的加固和防护,以增强卫星在空间的生存与防护能力。

目前,高功率激光武器主要有  $1.315 \mu\text{m}$  的氧化碘(COIL)激光器、 $2.7 \mu\text{m}$  的氟化氢(HF)激光器以及  $3.8 \mu\text{m}$  的氟化氘(DF)激光器<sup>[1-6]</sup> 3种。对卫星而言,常用的可见光/近红外 CCD 相机的工作波段为  $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ , 激光通信工作波长为  $1.55 \mu\text{m}$ <sup>[7-9]</sup>。因此,迫切需要研制在卫星工作波段有高透过率和激光武器波长处有较低透过率的激光防护窗口,实现卫星反激光武器的防护。

对于卫星激光防护膜,国内外已进行过相关研究。美陆军纳蒂克研究中心<sup>[10]</sup> 研制一种组合式层状结构防护镜,其利用多层介质膜可对特定波长激光的反射衰减达到激光防护效果。据报道可防护 532、694 和  $1064 \text{ nm}$  3种激光,光密度为 4,可见光透过率达 73%,其主要缺点是玻璃箔易损。兰州物理研究所<sup>[11]</sup> 选取  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  作为高低折射率镀膜材料,在 K9 玻璃设计和制备了可以对氧碘激光进行防护的薄膜,在遥感仪器的工作波段  $500 \sim 900 \text{ nm}$  内,平均透射率达到 95.2%,在以  $1315 \text{ nm}$  为中心的一定波段范围内,反射率超过 99.3%,可有效防护星载遥感仪器,大幅度提高遥感仪器的生存能力。长春理工大学<sup>[12-15]</sup> 在可见光/近红外波段开展了大量的激

光防护薄膜研究,针对军用光电仪器对激光致盲武器的防护要求,采用 Si 和  $\text{YbF}_3$ , ZnS 和  $\text{YbF}_3$  两种高低折射率组合材料研制了激光防护减反射膜。在多光谱 ZnS 基底上,采用电子束及离子辅助沉积技术,制备了能够对  $532 \text{ nm}$  和  $1064 \text{ nm}$  激光进行有效防护,同时对  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  的波段具有高透射率的薄膜。

本文针对  $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$  可见光/近红外 CCD 相机、 $1.55 \mu\text{m}$  的激光通信波段以及  $1.315$ 、 $2.7$ 、 $3.8 \mu\text{m}$  的激光武器工作波段,设计和制备了线性激光防护薄膜,实现工作波段的高透过和激光武器波段的低透过,对于卫星平台防护激光武器具有重要的作用。

## 2 薄膜光学常数计算

本文采用 Lambda900 分光光度计对熔融石英基底上  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  薄膜的可见光-近红外透射光谱进行了测量,测量结果如图 1 所示。采用

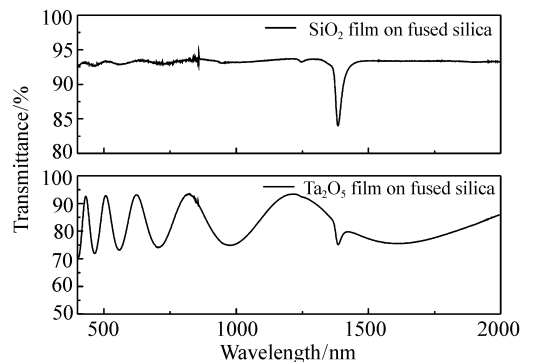


图1  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜和  $\text{SiO}_2$  薄膜的可见光-近红外透射率曲线

Fig. 1 Transmittance curves of  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  and  $\text{SiO}_2$  films in the range from visible to near infrared wave band

BRUKER 公司的 VERTEX70 型红外傅立叶变换光谱仪对 Si 基底上  $Ta_2O_5$  和  $SiO_2$  薄膜的近红外-中红外透射光谱进行了测量,如图 2 所示。

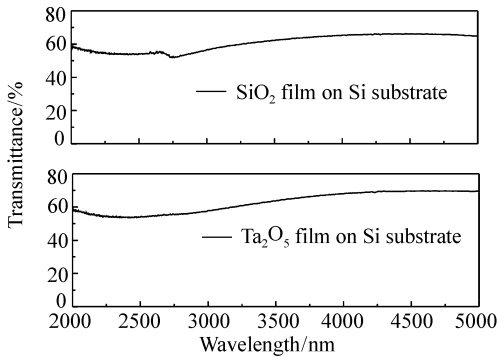


图 2  $Ta_2O_5$  薄膜和  $SiO_2$  薄膜的近红外-中红外透射率曲线

Fig. 2 Transmittance curves of  $Ta_2O_5$  film and  $SiO_2$  film in the range from near infrared to middle infrared wave band

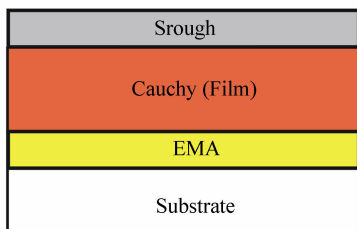


图 3 单层膜结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single-layer film structure

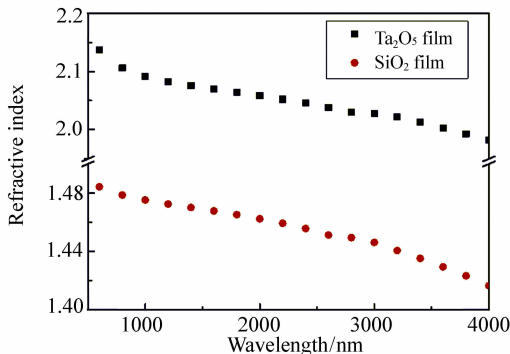


图 4 离子束溅射  $Ta_2O_5$  和  $SiO_2$  薄膜的折射率曲线

Fig. 4 Refractive index curves of  $Ta_2O_5$  and  $SiO_2$  films prepared by IBS

本文采用 WVASE32 软件对测量的透射光谱数据进行了拟合,在计算单层膜特性拟合过程中,选择的折射率模型包括基底、有效介质近似层(包括 50% 的基底和 50% 的单层膜)、柯西模型层和表面粗糙度层(包括 50% 的空气和 50% 单层膜),如图 3 所示。获得的  $Ta_2O_5$  薄膜和  $SiO_2$  薄膜的物理厚度分别为 591.1 和 870.9 nm,折射率曲线如图 4 所示。

### 3 线性激光防护窗口的设计

以可见光  $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$  和激光通信  $1.55 \mu\text{m}$  波段的透过和  $1.315$ 、 $2.7$  和  $3.8 \mu\text{m}$  强激光的防护为背景进行设计,其线性激光薄膜防护窗口结构示意图如图 5 所示,选择 10 mm 厚的 k9 玻璃为窗口基底, $Ta_2O_5$  和  $SiO_2$  分别为高低折射率薄膜材料。

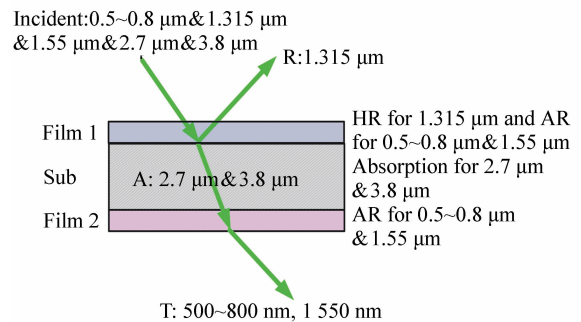


图 5 线性激光防护窗口示意图

Fig. 5 Schematic diagram of linear laser protection window

在 k9 基底一面设计工作角度为  $0^\circ$  的三波段分光薄膜,实现  $1.315 \mu\text{m}$  波长的反射和  $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$  波段的增透,基本膜系结构为  $\text{Sub}/(0.5L H 0.5L)^{14}/\text{Air}$ ,参考波长为  $1.315 \mu\text{m}$ ,优化前 6 层和后 7 层后,最终膜系结构为:  $\text{Sub}/0.98L 0.93H 0.95L 0.99H 1.01L 0.99H (L H)^8 1.01L 0.92H 0.88L 0.87H 0.98L 1.05H 0.51L/\text{Air}$ ,理论设计透射率曲线如图 6 所示。

在 k9 基底另一面设计工作角度为  $0^\circ$  的双波段减反射薄膜,实现  $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$  和  $1.55 \mu\text{m}$  波段的增透,基本膜系结构为  $\text{Sub}/(LH)^5 L/\text{Air}$ ,

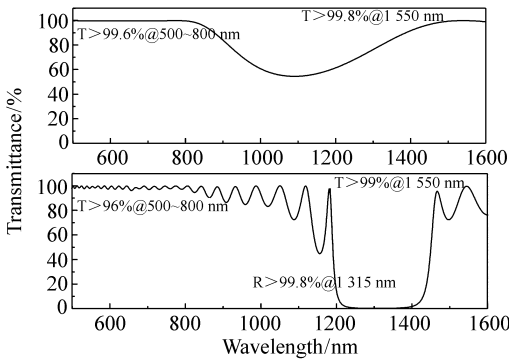


图6 双波段减反射薄膜和三波段分光薄膜的理论设计透过率曲线

Fig.6 Theoretical design transmittance curve of two-band antireflective film and three band spectroscopic thin film

参考波长为 0.65 μm,对所有膜层全优化后获得最终膜系结构为:Sub/0.97L 0.15H 0.50L 1.86H 1.67L 1.67H 1.02L 0.17H 0.48L 0.97H 0.94L / Air,理论设计透过率曲线也如图6所示。

通过三波段分光膜和双波段减反射薄膜共同作用即可获得多谱段线性激光防护薄膜窗口,其理论设计透过率曲线如图7所示。可以得到:对于 0.5~0.8 μm 和 1.55 μm 波段,能分别实现大于 95% 和 98% 的透过;对于 1.315、2.7、3.8 μm 波段能分别实现小于 0.1%、20% 和 0.5% 的透过。综合分析,设计的线性激光防护薄膜窗口能实现可见光 0.5~0.8 μm 和激光通信 1.55 μm 波段的透过和 1.315、2.7 和 3.8 μm 强激光的低透过,既满足了卫星工作波段的高透过,又能防护强激光武器的攻击。

### 4 线性激光防护窗口的制备和分析

采用双离子束溅射沉积技术,根据第2节结果,选择 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 分别作为高低折射率薄膜材料,在 K9 基底上制备了线性激光防护窗口薄膜。采用 Lambda900 分光光度计对双面镀膜的线性激光防护窗口薄膜的可见光-近红外透射曲线进行测试,测试结果如图8所示,采用 BRUKER 公司的 VERTEX70 型红外傅立叶变换光谱仪对其近红外-中红外波段的透射光谱进行了测试,测

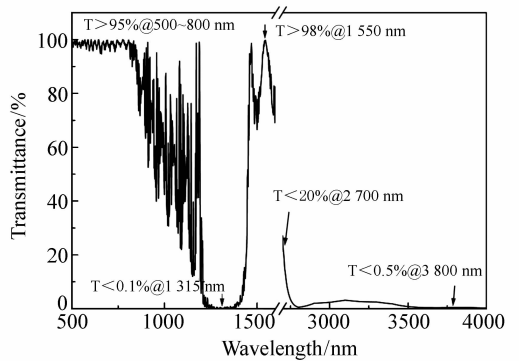


图7 线性激光防护窗口的理论设计透过率曲线  
Fig.7 Theoretical design transmittance curve of linear laser protection window

试结果如图9所示。

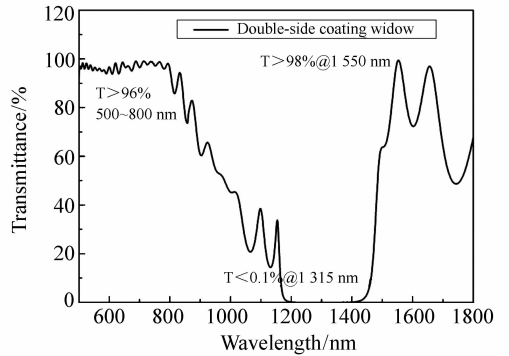


图8 线性激光防护窗口薄膜的可见光-近红外透射曲线  
Fig.8 Measured visible-near infrared transmission curve of linear laser protective window

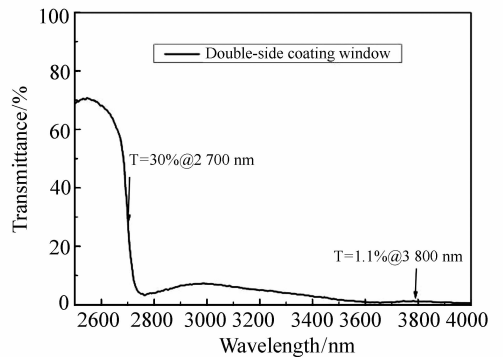


图9 线性激光防护窗口薄膜的近红外-中红外透射曲线  
Fig.9 Measured near infrared-middle infrared transmission curve of linear laser protective window

由图8和图9的测试曲线与图7的理论设计曲线对比可知,线性激光防护窗口的测试曲线与理论设计曲线基本吻合,在 $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 的平均透过率大于96%, $1.55 \mu\text{m}$ 的透过率大于98%, $1.315 \mu\text{m}$ 的透过率小于0.1%,在 $2.7 \mu\text{m}$ 的透过率为30%,在 $3.8 \mu\text{m}$ 的透过率为1.1%。

线性激光防护窗口的测试结果表明,采用离子束溅射沉积技术,在k9玻璃一面镀制三波段分光膜,另一面镀制双波段减反射膜,可以实现 $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 可见光/近红外 CCD 相机和 $1.55 \mu\text{m}$ 的激光通信波段的高透过率, $1.315$ 、 $2.7$ 和 $3.8 \mu\text{m}$ 波段的低透过率。实验结果表明,在不影响可见光/近红外 CCD 相机和激光通信的正常工作条件下,实现了对工作波长为 $1.315$ 、 $2.7$ 和 $3.8 \mu\text{m}$ 的高功率激光的防护,防护效率分别达到30、5和20 dB,对于卫星平台防护激光武器具有重要的意义。

## 5 结 论

本文针对 $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 可见光/近红外 CCD 相机、 $1.55 \mu\text{m}$ 的激光通信波段,在K9玻璃基底上一面设计和制备了三波段分光膜,实现 $1.315 \mu\text{m}$ 波长的反射和 $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$ 波段的增透,然后在k9玻璃基板另一面设计和制备了双波段减反射膜,实现 $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 波段的增透。研制的防护窗口在 $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 的平均透过率大于96%, $1.55 \mu\text{m}$ 的透过率大于98%, $1.315 \mu\text{m}$ 的透过率小于0.1%,在 $2.7 \mu\text{m}$ 的透过率为30%,在 $3.8 \mu\text{m}$ 的透过率为1.1%,实现了对高功率激光的防护。实验结果表明,该方法实现了可见光-近红外-中红外波段激光防护窗口的制备,对于卫星平台防护激光武器具有重要的作用。

## 参考文献:

- [1] INAGAKI H, KANNARI F, SUDA A, *et al.*. High-efficiency multikilojoule deuterium fluoride (DF) chemical lasers initiated by intense electron beams[J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 59(2): 324-326.
- [2] RAZHEV A M, CHURKIND D S, KARGAPOL'TSEV E S. Chemical HF laser with pulsed inductive discharge initiation[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(7): 075002.
- [3] 柯常军, 李晨, 谭荣清, 等. 电引发非链式脉冲 DF 激光器实验研究[J]. 光电子·激光, 2010, 22(2): 172-174.  
KE CH J, LI CH, TAN R Q, *et al.*. Experimental research on electric-discharge non-chain pulsed DF lasers[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 22(2): 172-174. (in Chinese)
- [4] 易爱平, 刘晶儒, 唐影, 等. 放电激励重复频率非链式 HF 激光器[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(7): 1763-1766.  
YI A P, LIU J R, TANG Y, *et al.*. Discharge pumped repetition-rate non-chain HF laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7): 1763-1766. (in Chinese)
- [5] 唐影, 黄珂, 易爱平, 等. 放电激励重复频率 HF 激光器稳定输出实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0202004.  
TANG Y, HUANG K, YI A P, *et al.*. Experimental study on stable output of discharge-pumped repetition rate HF laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0202004. (in Chinese)
- [6] 易爱平, 刘晶儒, 唐影, 等. 电激励重复频率非链式 HF 激光器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 360-366.  
YI A P, LIU J R, TANG Y, *et al.*. Electrically initiated repetitive-pulsed non-chain HF lasers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 360-366. (in Chinese)
- [7] 陶淑苹, 郑晓云, 朴永杰. 高分辨率大面阵微型相机设计[J]. 液晶与显示, 2015, 30(3): 514-518.  
TAO SH P, ZHENG X Y, PIAO Y J. Design of miniature camera with high resolution and large area array[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(3): 514-518. (in Chinese)
- [8] 石俊霞, 李佩玥, 李洪法, 等. 遥感 TDICCD 相机侧摆成像及定位精度优化[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 777-784.  
SHI J X, LI P Y, LI H F, *et al.*. Scroll imaging of space TDI CCD remote sensing camera and optimization of image location accuracy[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 777-784. (in Chinese)
- [9] 徐拓奇, 张刘, 徐伟, 等. 空间目标图像的天基动态识别[J]. 液晶与显示, 2012, 27(3): 406-413.

- XU T Q,ZHANG L,XU W,*et al.*. Space-based dynamic space targets images identification[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*,2012,27(3):406-413. (in Chinese)
- [10] 罗振坤. 激光致盲安全防护技术[J]. 激光杂志,2000,21(3):4-5.  
LUO ZH K. The safe-protection techniques for laser[J]. *Laser Journal*,2000,21(3):4-5. (in Chinese)
- [11] 熊玉卿,罗崇泰. 星载光学遥感仪器激光防护薄膜技术[J]. 红外与激光工程,2017,36(6):902-905.  
XIONG Y Q,LUO CH T. Laser protection thin film for satellite-borne remote sensing instrument[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2017,36(6):902-905. (in Chinese)
- [12] 宫大为,付秀华,耿似玉,等. 红外双波段激光滤光膜的研制[J]. 中国光学,2011,4(3):293-298.  
GONG D W,FU X H,GENG S Y,*et al.*. Design and manufacture of infrared double waveband laser filter films[J]. *Chinese Optics*,2011,4(3):293-298. (in Chinese)
- [13] 石澎,付秀华,孙岩,等. 双波段激光防护红外减反膜的研制[J]. 中国激光,2011,38(4):0407003.  
SHI P,FU X H,SUN Y,*et al.*. Design and fabrication of double wavelength laser protective infrared antireflection coatings[J]. *Chinese Journal of Lasers*,2011,38(4):0407003. (in Chinese)
- [14] 赵纛慰,付秀华,李珊,等. 多功能抗激光损伤高反射膜[J]. 中国光学与应用光学,2010,3(3):274-278.  
ZHAO Y W,FU X H,LI SH,*et al.*. Anti-laser-induced damage high reflectance film with multifunction[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*,2010,3(3):274-278. (in Chinese)
- [15] 杨道奇,付秀华,耿似玉,等. 0.6~1.55  $\mu\text{m}$  可见/近红外超宽带增透膜的研制[J]. 中国光学,2012,5(3):270-276.  
YANG D Q,FU X H,GENG S Y,*et al.*. Design and fabrication of 0.6-1.55  $\mu\text{m}$  visible/near infrared ultra-broad band antireflection coatings[J]. *Chinese Optics*,2012,5(3):270-276. (in Chinese)

#### 作者简介:



姜玉刚(1985—),男,安徽霍邱人,博士后,高级工程师,主要从事低损耗激光薄膜、固体激光薄膜设计、制备和检测技术方面的研究。E-mail: jygang\_4089@163.com



刘华松(1980—),男,辽宁阜新人,博士,研究员,主要从事光学薄膜的设计、制备与表征技术,光学薄膜材料物理方面的研究。E-mail: liuhuasong@hotmail.com