

1064 nm 负滤光片的设计与制备

刘祺¹ 徐均琪^{1*} 苏俊宏¹ 刘政²

(1. 西安工业大学陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室 西安 710021;
2. 中国科学院西安精密机械研究所先进光学制造技术联合实验室 西安 710119)

Design and Preparation of 1064 nm Notch Filter

LIU Qi¹, XU Junqi^{1*}, SU Junhong¹, LIU Zheng²

(1. Shaanxi Province Thin Film Technology and Optical Test Open Key Laboratory, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Advanced Optical Manufacturing Technology Joint and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

Abstract According to the current laser protection requirements of human eyes and visible-near-infrared photodetectors, the design method and fabrication technology of a 1064 nm notch filter were studied. Based on the equivalent refractive index theory, considering the optimization of spectrum and field intensity distribution, the notch filter of a quarter film composed of $\text{SiO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2$ and the notch filter of a non-quarter film composed of $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ were designed. The notch filter was fabricated by ion beam-assisted thermal evaporation deposition, and its optical and anti-laser damage properties were tested. The results show that matching the antireflection film on both sides of the film structure of $\text{G}[(0.5\text{LH}0.5\text{L})^s]\text{A}$ can effectively reduce the passband ripple, and adjusting the thickness of the outermost layer of the film system can improve the spectral characteristics and electric field intensity distribution of the film system at the same time. The average transmittance of the plated notch filter of quarter film at the 400~900 nm and 1200~2000 nm bands is 89.98% and 93.21% respectively, the transmittance at 1064 nm is 1.29%, and the laser damage threshold is 6.0 J/cm^2 ; the average transmittance of the notch filter of the non-quarter film is 93.70% and 94.99% at 650~900 nm and 1200~2000 nm bands respectively, the transmittance at 1064 nm is 1.60%, and the laser damage threshold is 6.8 J/cm^2 .

Keywords Notch filter, Design, Optimization, Ion beam-assisted, Laser-induced damage threshold (LIDT)

摘要 针对当前可见-近红外光电探测器的激光防护要求,研究了1064 nm负滤光片的设计和制备。基于等效折射率理论,综合考虑光谱和场强分布优化,设计了由 $\text{SiO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2$ 组合的规整膜系和 $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ 组合的非规整膜系负滤光片;采用离子束辅助热蒸发沉积方式对负滤光片进行了制备,并测试了其光学和抗激光损伤性能。结果表明:在膜系结构 $\text{G}[(0.5\text{LH}0.5\text{L})^s]\text{A}$ 两侧匹配减反膜可以有效减小通带波纹,调整膜系最外层厚度可以同时改善膜系的光谱特性和电场强度分布。镀制的规整膜系负滤光片在400~900 nm和1200~2000 nm波段平均透过率分别为89.98%和93.21%,1064 nm透过率为1.29%,激光损伤阈值为 6.0 J/cm^2 ;非规整膜系负滤光片在650~900 nm和1200~2000 nm波段平均透过率分别为93.70%和94.99%,1064 nm透过率为1.60%,激光损伤阈值为 6.8 J/cm^2 。

关键词 负滤光片 设计 优化 离子束辅助 激光损伤阈值

中图分类号: O484

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202204022

负滤光片又叫陷波滤光片,其光谱特性呈凹形,可以透射较宽波长范围的光波,而将特定波长的光衰减到非常低的水平^[1]。负滤光片按照阻带数不同

分为单陷波和多波陷波滤光片,被广泛应用于信号处理^[2]、光学显示系统^[3-4]、生物医学工程^[5-6]、激光防护等领域^[7-8]。其中,在激光防护方面由于其反射特

收稿日期: 2022-04-25

基金项目: 陕西省国际科技合作与交流计划资助项目(2018KWZ-02); 西安市智能探视感知重点实验室项目(201805061ZD12CG45)

* 联系人: E-mail: jqux2210@163.com

定波长激光的同时不影响其他有用波段的光高透过,与传统的半透半反滤光片相比更具优势。

近些年,科研人员对负滤光片作了很多研究。Ajay^[9]将膜系为 $G|(3H3L)^{15}3H|A$ 的 550 nm 负滤光片,最外层 3H 改为具有增透膜结构的 2.02H0.96L,改善了通带波纹,但截止带两侧反射次峰并未消除。Zhang 等^[10]应用等效层理论,设计了膜系为 $G|(3M3L)^2(3H3L)^9(3M3L)^2D|A$ 的 532 nm 负滤光片,主膜系两旁的匹配层成功抑制了反射次峰,但引入了四种膜料,不利于材料选择与制备。Salehpoor 等^[11]采用两种材料设计了膜系为 $G|(5H5L)^2(3H3L)^9(5H5L)^2HL|A$ 的 532 nm 负滤光片,主膜系采用 3 和 5 的系数组合,减小了通带波纹,但这种方法在设计阻带位于红外波段的负滤光片时,容易在短波区产生多个反射带。基于 Rugate 理论设计负滤光片,可以消除次级反射带,但其膜层折射率连续变化的特点,很难通过热蒸发方式制备^[12-14]。

离散层(HL)法设计的薄膜,材料的折射率固定且膜层周期性变化,更容易实现制备。另外,材料折射率差值较大,使截止带达到一定反射率所需膜层数变少^[15],有利于减小膜层间的应力,提高薄膜抗激光损伤性能^[16]。目前军事上,通常采用波长为 1064 nm 的 ND: YAG 激光器对目标进行定位和跟踪,发射的激光会对光电探测器造成破坏^[17]。军事上常用的可见-近红外双色探测器可探测的光谱范围为 400~1700 nm^[18]。基于以上讨论,本文将采用离散层(HL)设计法,设计在可见-近红外波段具有高透过率,同时可以抗 1064 nm 激光损伤的负滤光片。并通过离子束辅助热蒸发沉积的方式,对设计的负滤光片进行制备;对制备的负滤光片进行光谱特性和激光损伤性能测试。

1 膜系设计

1.1 初始设计

设计负滤光片的基本膜系结构为 $G|(0.5LH0.5L)^s|A$ ^[19],其中 H、L 分别表示高、低折射率材料, s 表示膜层周期数。负滤光片设计时要考虑两个问题:一是截止带宽度要尽可能窄,二是截止带两侧通带透过率要尽可能高。截止带宽度与膜层干涉级次有关,级次越高截止带越窄。将膜系调整为 $G|(0.5mLmH0.5mL)^s|A$, m 取 3、5、7 等奇数时,中心波长变为 $3\lambda_0$ 、 $5\lambda_0$ 、 $7\lambda_0$,则 λ_0 将分别处于 3 级次、5

级次、7 级次位置。高级次设计虽然可以成倍的压缩截止带宽度,但膜层厚度也会成倍增加,造成膜层吸收变大。另外,这种设计容易造成次级反射带落在有用光范围内,使通带范围变小。截止带宽度还与组成多层膜材料的高低折射率值有关,用相对波数表示为

$$2\Delta g = \frac{4}{\pi} \arcsin\left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}\right) \quad (1)$$

设高低折射率之比 n_H/n_L 为 x ,则式(1)可表示为

$$2\Delta g = \frac{4}{\pi} \arcsin\left(\frac{x-1}{x+1}\right) \quad (2)$$

可见 $2\Delta g$ 是关于 x 的增函数,即高低折射率比值越大截止带越宽。截止带宽度的压缩可以通过选取两种折射率接近的材料实现,但从式(3)可以看出,高低折射率比值较小时,要达到较高的反射率,需要提高膜层的周期数。

$$R = \frac{n_g - (n_H/n_L)^{2s} n_H^2}{n_g + (n_H/n_L)^{2s} n_H^2} \quad (3)$$

式(3)中 n_g 表示基底折射率。本文膜系设计时,选择折射率为 1.96(波长 1064 nm 处)的 H4 作为高折射率材料,折射率为 1.46(波长 1064 nm 处)的 SiO_2 作为低折射率材料。两种材料折射率比值为 1.34,在满足一定反射率的条件下,可获得较小的截止带宽。另外,两种材料应力互补,抗激光损伤性能良好,有利于提高多层膜耐用性。选择基底材料为折射率 1.52 的 K9 玻璃,入射介质为空气。通过式(3)确定反射率达到 99% 以上时,膜系周期数 s 为 11,得到膜系结构为 $G|(0.5LH0.5L)^{11}|A$ 。图 1 为该膜系的透过率光谱,截止带半宽度为 245 nm,波

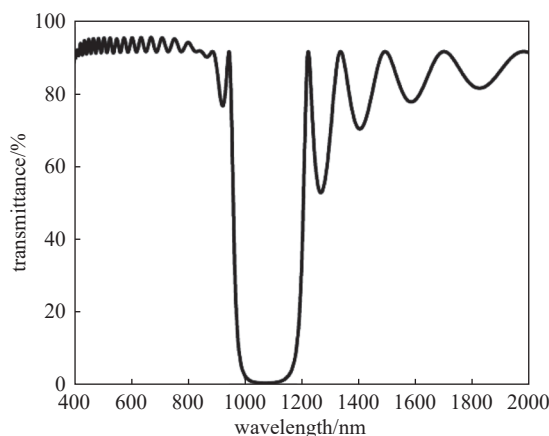


图1 膜系 $G|(0.5LH0.5L)^{11}|A$ 理论透过率光谱

Fig. 1 Theory transmittance spectra of film system $G|(0.5LH0.5L)^{11}|A$

长 1064 nm 处的透过率为 0.63%。由于膜系的等效折射率与周围介质的折射率不匹配,在截止带左侧出现明显反射次峰,通带右侧出现了较大的波纹。

为了消除通带内的波纹,选择在膜系两侧添加减反膜,同时考虑多层膜的强色散,减反膜确定为与多层膜类似的结构 $(0.5LM0.5L)^s$ 。根据减反射条件,靠近基底侧和空气侧的减反射膜等效折射率应分别满足

$$E(n_L, n_M) = \sqrt{n_g E(n_L, n_H)} \quad (4)$$

$$E(n_L, n_M) = \sqrt{n_0 E(n_L, n_H)} \quad (5)$$

对于结构为 $(0.5pq0.5p)^s$ 的周期性多层膜,当光垂直入射时,其等效折射率表示为

$$E = n_p \left[\frac{\cos \frac{\pi \lambda_0}{2\lambda} - \frac{1 - n_q/n_p}{1 + n_q/n_p}}{\cos \frac{\pi \lambda_0}{2\lambda} + \frac{1 - n_q/n_p}{1 + n_q/n_p}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

虽然多层膜的色散可以通过减反膜的类似色散补偿,但这种补偿是近似的。本文选择通带最大波纹对应的位置 $\lambda=1260$ nm 作为匹配点,将 $n_H=1.96$, $n_L=1.46$, $\lambda_0/\lambda=0.84$, 代入式(6)得 $E(n_L, n_H)=2.83$ 。联立式(4)~(6), 其中 $n_g=1.52$ 、 $n_0=1$, 求得靠近基底侧和空气侧材料 M 的折射率分别为 1.72 和 1.56。在作者制备的单层膜中, Y_2O_3 的折射率为 1.72(波长 1064 nm 处), 满足基底侧的匹配。因此初始设计的膜系结构为 $G|(0.5LM0.5L)^2(0.5LH0.5L)^7(0.5LM0.5L)^2|A$, 其中 $n_M=1.72$, 该膜系理论透过率光谱如图 2 所示, 电场强度分布如图 3 所示。

从图 2 看, 添加匹配层后, 截止带两侧反射次

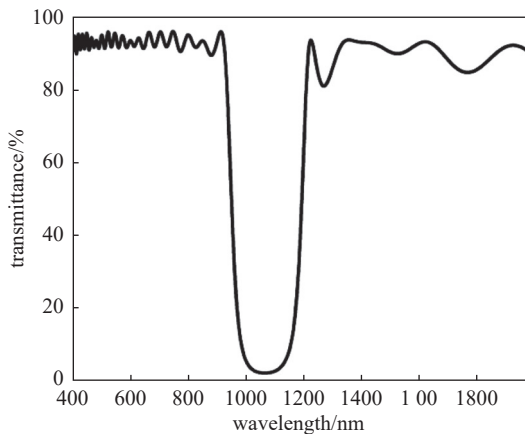


图2 膜系 $G|(0.5LM0.5L)^2(0.5LH0.5L)^7(0.5LM0.5L)^2|A$ 图

Fig. 2 Theory transmittance spectra of film system $G|(0.5LM0.5L)^2(0.5LH0.5L)^7(0.5LM0.5L)^2|A$

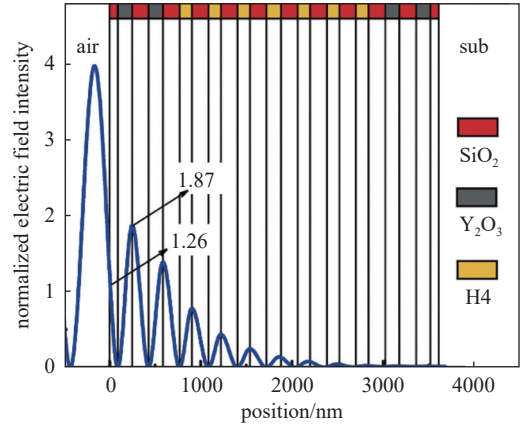


图3 膜系 $G|(0.5LM0.5L)^2(0.5LH0.5L)^7(0.5LM0.5L)^2|A$ 的理论透过率光谱的电场强度分布

Fig. 3 Electric field intensity distribution of film system $G|(0.5LM0.5L)^2(0.5LH0.5L)^7(0.5LM0.5L)^2|A$

峰得到明显抑制, 右侧通带波纹得到明显改善。但由于可选材料限制, 空气侧并没有达到理想的匹配效果, 造成截止带右侧出现明显反射次峰。研究表明, 薄膜/空气界面、膜层间界面、薄膜/基底界面是整个膜系最薄弱的环节, 这些位置较高的电场强度是导致薄膜发生激光损伤的重要原因^[20]。从图 3 看, 膜层与空气界面的电场强度为 1.26, 膜层内部电场强度峰均落在膜层间界面上, 在理论上不具有较强的抗激光损伤性能。

1.2 优化设计

根据等效折射率理论, 将空气侧的 SiO_2 厚度从 $\lambda_0/8$ 增大到 $\lambda_0/2$, 解决了空气侧膜层的匹配问题, 同时优化了膜层的电场强度分布。去除基底侧 SiO_2 不会对膜系光谱和场强造成影响, 因此确定优

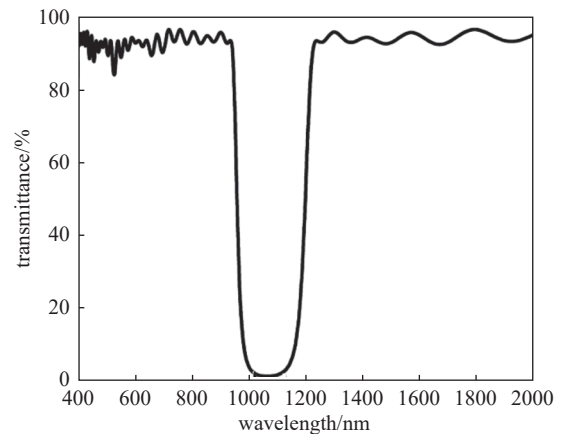


图4 膜系 $G|(ML)^2(HL)^7(ML)^2L|A$ 的理论透过率光谱图

Fig. 4 Theory transmittance spectra of film system $G|(ML)^2(HL)^7(ML)^2L|A$

化后的规整膜系为 $G|(ML)^2(HL)^7(ML)^2L|A$ 。从图4看,膜系经过优化后截止带右侧反射次峰得到明显抑制,表现出更好的光学性能;从图5看,膜层/空气界面电场强度由 1.26 减小到了 0,膜层内部最大电场强度从膜层间界面移动到具有较强抗激光损伤性能的 SiO_2 内部,理论上可以提高激光损伤阈值。

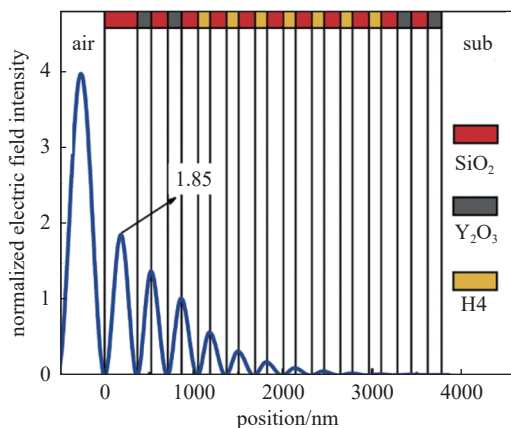


图5 膜系 $G|(ML)^2(HL)^7(ML)^2L|A$ 的电场强度分布

Fig. 5 Electric field intensity distribution of film system $G|(ML)^2(HL)^7(ML)^2L|A$

优化的规整膜系,为了消除通带波纹,主膜系两端的减反膜引入了第三种材料 Y_2O_3 。然而,在实际中能够完全满足匹配条件的膜料非常有限,给负滤光片的设计带来困难。根据等效折射率理论,消除通带波纹的匹配膜采用与主膜系类似的结构 $(0.5\alpha L\beta H0.5\alpha L)$,厚度比例满足 $(\alpha-\beta)/(\alpha+\beta)=\varepsilon(\varepsilon=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8)^{[21]}$ 。不同取值 ε 对应的 α 、 β 计算值如表1所示。

表1 ε 不同取值对应的 α 、 β 计算值

Tab. 1 The calculated values of α and β corresponding to different values of ε

ε	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
α	1	1.2	1.4	1.6	1.8
β	1	0.8	0.6	0.4	0.2

将表1中 α 、 β 值代入结构 $(0.5\alpha L\beta H0.5\alpha L)$,经TFC软件优化,得到非规整膜系 $G|(\alpha_1L\beta_1H)\cdots(\alpha_{11}L\beta_{11}H)\alpha_{12}L|A$ ($\alpha_1\cdots\alpha_{12}$ 、 $\beta_1\cdots\beta_{11}$ 为膜系厚度系数)。从图6看,非规整膜系的截止带两侧无明显反射次峰,通带透过率大于 94%, 1064 nm 处透过率小于 1.5%,光谱特性优良。从图7看,膜层/空气界面电场强度约为 0,膜层内最大场强落在 SiO_2 层,有利

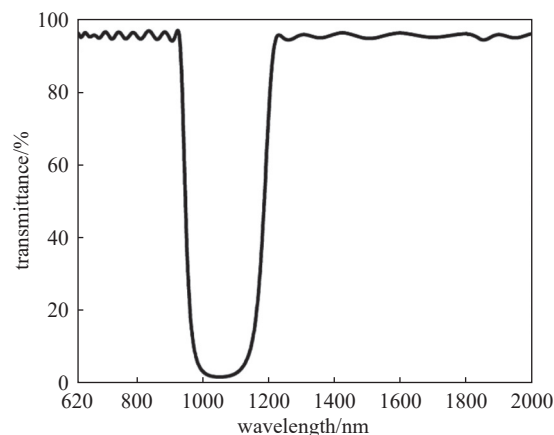


图6 膜系 $G|(\alpha_1L\beta_1H)\cdots(\alpha_{11}L\beta_{11}H)\alpha_{12}L|A$ 的理论透过率光谱图

Fig. 6 Theory transmittance spectra of film system $G|(\alpha_1L\beta_1H)\cdots(\alpha_{11}L\beta_{11}H)\alpha_{12}L|A$

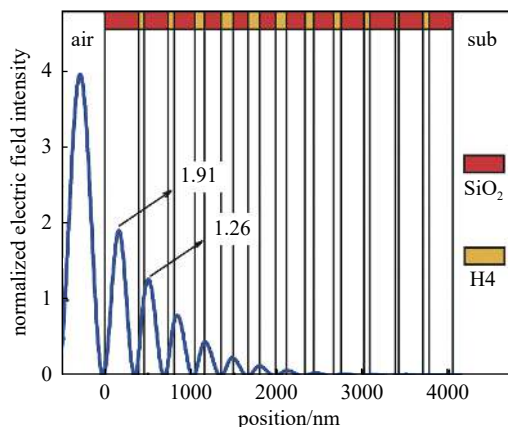


图7 膜系 $G|(\alpha_1L\beta_1H)\cdots(\alpha_{11}L\beta_{11}H)\alpha_{12}L|A$ 的电场强度分布

Fig. 7 Electric field intensity distribution of film system $G|(\alpha_1L\beta_1H)\cdots(\alpha_{11}L\beta_{11}H)\alpha_{12}L|A$

于提高薄膜的激光损伤阈值。

2 膜系制备与测试

2.1 膜系制备

采用离子束辅助热蒸发沉积方式,分别对优化设计的 $SiO_2/Y_2O_3/H4$ 组合的规整膜系和 $SiO_2/H4$ 组合的非规整膜系进行制备。两种膜系均采用南光ZZS800镀膜机镀制,石英晶体膜厚控制仪进行膜厚监控。组成负滤光片的每种材料都有其特定的沉积参数(沉积速率、真空度、基底温度等),合适的沉积参数可以降低多层膜的吸收,提高膜层的机械性能。另外薄膜的厚度,是利用石英晶体片的振动频率随其质量的变化特性间接监控的,测得的膜厚与实际基底上的膜厚存在差异。为了准确监控膜层的厚度,需要获得每种材料在镀膜基底与晶振片上膜层厚度的比值(比例因子)。前期经过多次实验,

表 2 不同材料膜层的工艺条件及沉积参数

Tab. 2 Process conditions and deposition parameters of different materials

Material	Electron gun beam/mA	Ionbeam intensity/mA	Deposition rate/nm·s ⁻¹	Working pressure/Pa	Substrate temperature/°C	Scale factor
SiO ₂	40	100	0.6	9.3×10 ⁻³	180	115
H4	90	100	0.15	1.7×10 ⁻²	180	125
Y ₂ O ₃	140	100	0.15	1.3×10 ⁻²	180	130

得到了镀制不同材料膜层合适的制备工艺^[22], 如表 2 所示。

按照表 2 所示工艺在 K9 玻璃基底上对多层膜进行了制备, 采用霍尔离子源进行辅助沉积, 离子源工作气体为氩气, 离子能量为 300 eV, 离子束流为 100 mA。离子束辅助过程为: 镀膜前先对基底清洗 180 s, 清除基底表面杂质; 镀膜过程中离子束辅助不间断, 去除薄膜吸附杂质, 降低薄膜吸收; 镀膜结束后继续用离子束轰击薄膜表面 180 s, 减小膜层内部空隙, 使膜层更致密。石英晶体的敏感度随膜层厚度的增加而降低, 为了提高监控精度, 每种材料用特定的晶体探头进行监控, 最大程度减少单个晶体上的薄膜厚度。经过多次实验和测试, 确定和修正负滤光片的工艺参数。

2.2 负滤光片的光谱及激光损伤特性

采用 U3501 分光光度计对规整膜系和非规整膜系负滤光片的透过率光谱进行了测试, 如图 8 所示。两种膜系在截止区的实测透过率与理论基本一致, 规整膜系和非规整膜系的中心波长分别向短波偏移了 5 nm 和 15 nm, 1064 nm 处透过率分别为 1.29% 和 1.60%。通带范围内整体透过率与理论值接近, 规整膜系在 400~900 nm 波段平均透过率为 89.98%, 1200~2000 nm 波段平均透过率为 93.21%; 非规整膜系在 650~900 nm 波段平均透过率为 93.70%, 1200~2000 nm 波段平均透过率为 94.99%。另外可以看出, 在实际制备中由于某些点存在折射率和厚度的失配, 同时膜层之间存在吸收, 导致实测透过率与理论出现偏差。透过率偏差在规整膜系中表现的更明显, 这是由于规整膜系比非规整膜系多一种 Y₂O₃ 材料, 材料越多对沉积工艺的稳定性要求越高, 折射率与厚度越容易产生误差。因此, 在膜系设计时要尽可能减少所用材料数, 从而减小薄膜的制备难度, 提高薄膜的光学性能。

采用课题组研发的激光损伤测试仪, 依据国际标准 ISO21254-1 中 1-on-1 方法, 对两种膜系负滤光片各进行了 3 次激光损伤阈值测试。激光输出波长

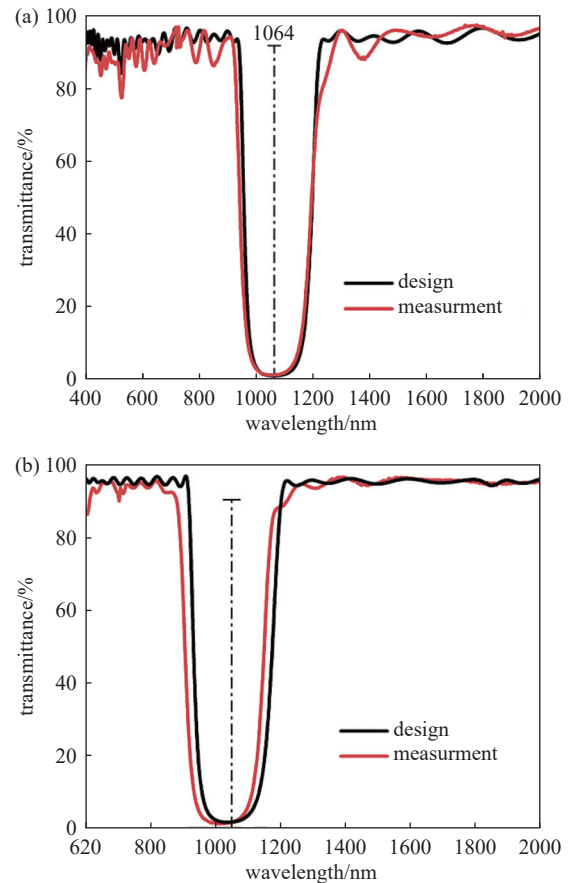


图8 规整膜系 $G|(ML)^2(HL)^7(ML)^2L|A$ 与非规整膜系 $G|(\alpha_1L\beta_1H)\cdots(\alpha_{11}L\beta_{11}H)\alpha_{12}L|A$ 的实测光谱。(a) 规整膜系, (b) 非规整膜系

Fig. 8 Measured transmittance spectra of quarter film system $G|(ML)^2(HL)^7(ML)^2L|A$ and non-quarter film system $G|(\alpha_1L\beta_1H)\cdots(\alpha_{11}L\beta_{11}H)\alpha_{12}L|A$. (a) quarter film, (b) non-quarter film

为 1064 nm, 脉冲宽度 10 ns, 光斑直径 0.8 mm, 损伤阈值测试结果如图 9 所示。

从图 9 测试结果看, 同一种膜系样片 3 次测量的损伤阈值结果差别不大, 说明同一镀膜机在相同工艺下镀制的薄膜激光损伤阈值具有一定重复性。规整膜系的激光损伤阈值的平均值为 6.0 J/cm², 小于非规整膜系的 6.8 J/cm²。然而从两种膜系的理论电场强度分布看, 膜层和空气界面处电场强度均为

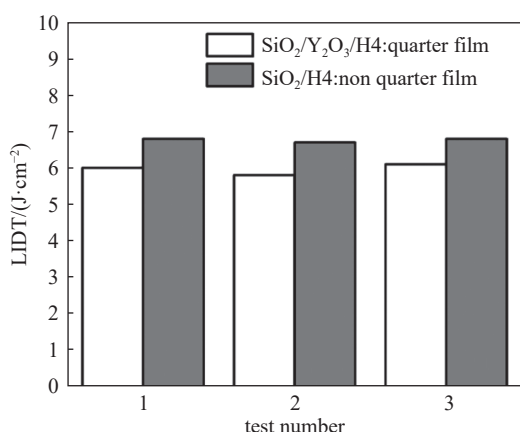


图9 SiO₂/Y₂O₃/H4 组合的规整膜系与 SiO₂/H4 组合的非规整膜系的激光损伤阈值测试结果

Fig. 9 Laser damage threshold test results of SiO₂/Y₂O₃/H4 quarter film system and SiO₂/H4 non-quarter film system

0, 非规整膜系内部最大电场强度为 1.91 略高于规整膜系的 1.85, 在理论上并不具有更高的抗激光损伤性能。研究表明, 薄膜内部的杂质缺陷会诱导薄膜中的电场分布发生变化, 导致局部电场增强, 且电场峰值始终位于缺陷与膜层的边界处^[23]。从图 8 透过率光谱看, 由于引入第三种材料 Y₂O₃, 规整膜系在短波的实际透过率与理论透过率的偏差, 整体大于非规整膜系, 这可能与 SiO₂/Y₂O₃ 膜层在制备时引入了更多的杂质吸收有关。这些杂质缺陷附近较高的电场强度诱导激光能量沉积的增加, 引起薄膜局部产生很强的温度场, 导致光学薄膜发生热应力损伤或熔融性损坏。另一方面, 在前期对单层膜的激光损伤阈值测试发现, Y₂O₃ 的激光损伤阈值为 7.9 J/cm² 小于 H4(8.4 J/cm²), 这也可能是规整膜系更容易发生损伤的原因。

为了进一步测试两种薄膜的抗激光损伤性能,

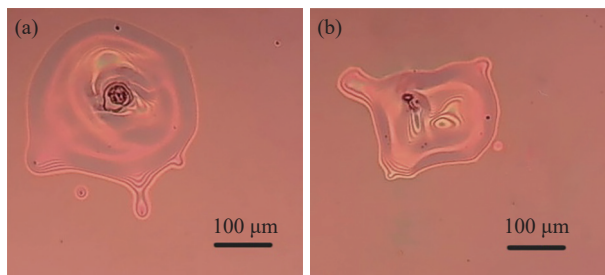


图10 薄膜的激光损伤形貌图。(a) SiO₂/Y₂O₃/H4 组合的规整膜系, (b) SiO₂/H4 组合的非规整膜系

Fig. 10 Laser damage morphology of thin film. (a) SiO₂/Y₂O₃/H4 quarter film system, (b) SiO₂/H4 non-quarter film system

采用远高于薄膜临界损伤的激光能量对薄膜进行了辐照, 图 10 为采用 80 mJ 的单脉冲激光对薄膜辐照后的损伤形貌图。可见规整膜系的损伤斑明显大于非规整膜系, 抗激光损伤性能更差。

3 结论

1) 通过理论计算和 TFC 软件仿真, 设计了 SiO₂/Y₂O₃/H4 组合的规整膜系负滤光片, 实测光谱在 400~900 nm 和 1200~2000 nm 波段平均透过率分别为 89.98% 和 93.21%, 1064 nm 透过率为 1.29%; 设计了 SiO₂/H4 组合的非规整膜系负滤光片, 实测光谱在 650~900 nm 和 1200~2000 nm 波段平均透过率分别为 93.70% 和 94.99%, 1064 nm 透过率为 1.60%。

2) 利用等效折射率理论, 在基底和空气侧分别匹配减反膜可以有效减小通带内的波纹; 通过改变空气侧的膜层厚度, 可以弥补膜层与空气折射率失配引起的反射次峰, 同时可以改善膜层内部电场强度分布, 在理论上提高薄膜激光损伤阈值。

3) 采用 1064 nm 激光, 依据 1-on-1 测试方法测得 SiO₂/H4 组合的非规整膜系负滤光片激光损伤阈值为 6.8 J/cm², 高于 SiO₂/Y₂O₃/H4 组合的规整膜系负滤光片(激光损伤阈值为 6.0 J/cm²)。在 80 mJ 能量辐照下, 相比较规整膜系负滤光片, 非规整膜系负滤光片损伤斑更小, 表现出更高的抗激光损伤性能。

参 考 文 献

- [1] Wang C, Wang J, Du H, et al. Optimal design and analysis of refractive index and thickness gradient optical films[J]. *Results in Optics*, 2021, 5: 100161
- [2] Nikolic S V, Stancic G Z, Cvetkovic S Design of nearly linear-phase double notch digital filters with close notch frequencies[J]. *IET Signal Processing*, 2018, 12(9): 1107-1144.
- [3] Han Y X, Yang J B, He X, et al. Multiband notch filter based guided-mode resonance for mid-infrared spectroscopy[J]. *Optics Communications*, 2019, 445: 64-68
- [4] Jiang Y F, Wu D S, Huang F Y. Design of true-color night vision system based on minus filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1211003
- [5] Chhasatia R, Sweetman M J, Prieto-Simon B, et al. Performance optimisation of porous silicon rugate filter biosensor for the detection of insulin[J]. *Sensors and Ac-*

- tuators: *B Chemical*, 2018, 273: 1313–1322
- [6] Hoggan R N, Subhash A, Blair S, et al. Thin-film optical notch filter spectacle coatings for the treatment of migraine and photophobia[J]. *Journal of Clinical Neuroscience*, 2016, 28: 71–76
- [7] Pu Y T, Ma P, Lv L, et al. Enhanced thermomechanical stability on laser-induced damage by functionally graded layers in quasi-rugate filters[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 440: 288–293
- [8] Tien C L, Lin H Y, Cheng K S, et al. Design and fabrication of laser protective lenses based on multilayered notch filter with low residual stress and low surface roughness[J]. *Coatings*, 2021, 11(12): 1513
- [9] Shankar A, Kumar S. Using a pair of antireflection layer in a minus filter to suppress ripples in the HUD-beam combiner[J]. *Journal of optics*, 2014, 43(3): 257–259
- [10] Zhang B S, Ma M J, Xiong Y Q, et al. Study on design and deposition of minus filters for laser protection application[J]. *Physics Procedia*, 2011, 18(1): 81–84
- [11] Mohammadreza S, Hossein V, Heidary F A, et al. Designing and manufacturing of interference notch filter with a single reflection band[J]. *Optik*, 2022, 249: 168202
- [12] Southwell W H. Using apodization functions to reduce sidelobes in rugate filters[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(23): 5091–5094
- [13] Zhou Q B, Chen J H, Song Y H, et al. Design and analysis of variable index optical films[J]. *New Technology and New Process*, 2020(05): 47–51 (周启飏, 陈建华, 宋余华, 等. 变折射率光学薄膜设计与分析[J]. *新技术新工艺*, 2020(05): 47–51(in chinese))
- [14] Zhang Y, Wang Y Z, Zhao J L, et al. Experimental demonstration of narrow-band rugate minus filters using rapidly alternating deposition technology[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(5): 054217
- [15] Schallenberg U, Ploss B, Lappschies M, et al. Design and manufacturing of high-performance notch filters[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2010, 7739: 720–728
- [16] Qiao Z, Ma P, Liu H, et al. Laser-induced damage of rugate and quarter-wave stacks high reflectors deposited by ion-beam sputtering[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(8): 6103
- [17] Chen J Y, Liao L W, Zeng P. Analysis of the development of American ground-based anti-satellite laser weapons[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S1): 42–47 (陈军燕, 廖龙文, 曾鹏. 美国地基反卫星激光武器发展分析[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(S1): 42–47(in chinese))
- [18] Dong X F, Chai S G, Li R Z. Wavelength-extended vision-near-infrared two-color photodetector[J]. *Electronic Technology*, 2020, 49(07): 1–3 (董绪丰, 柴松刚, 李睿智. 波长拓展型可见-近红外双色光电探测器[J]. *电子技术*, 2020, 49(07): 1–3(in chinese))
- [19] Macleod H A. Thin-film optical filters, fifth edition[M]. CRC Press, 2017: 697
- [20] Xu J Q, Guo F, Su J H, et al. Design and preparation of laser thin films[J]. *Surface Technology*, 2014, 43(2): 75–78 (徐均琪, 郭芳, 苏俊宏, 等. 激光薄膜的设计与制备[J]. *表面技术*, 2014, 43(2): 75–78(in chinese))
- [21] Tang J F, Gu P F, Liu X, et al. Modern optical thin film technology[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2006: 492 (唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2006: 492(in chinese))
- [22] Liu Q. The study of preparation method and laser damage characteristics of notch filters at the wavelength of 1064 nm[D]. Xi'an Technological University, 2022 (刘祺. 1064 nm负滤光片制备及激光损伤特性研究[D]. 西安工业大学, 2022(in chinese))
- [23] Wu J H, Ling X L, Liu J, et al. Optical field enhancement damage analysis of defect induced optical films[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(08): 319–324 (武锦辉, 凌秀兰, 刘吉, 等. 缺陷诱导光学薄膜光场增强损伤分析[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(08): 319–324(in chinese))