

# 反射型组合器件的空间滤波分析

章 瑛<sup>1,2</sup> 王胭脂<sup>1</sup> 齐红基<sup>1</sup> 易 葵<sup>1</sup> 隋 展<sup>3</sup> 邵建达<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

<sup>3</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 相比透射型组合滤波器件,提出了只需要由一种反射元件构成的反射型组合滤波器件的光路。在保证角谱选择性的前提下,降低了设计和制备的难度。另外,通过膜系设计和电场强度比较,发现此反射型组合器件具有比透射型组合器件更高的抗激光损伤阈值(LIDT)。因此,为反射型介质膜组合滤波器件的制备和应用奠定了基础,具有重要的指导意义。

**关键词** 光学器件; 反射组合器件; 介质膜; 激光损伤阈值;

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0616002

## Analysis on Spatial Filtering by Reflecting Combination Device

Zhang Ying<sup>1,2</sup> Wang Yanzhi<sup>1</sup> Qi Hongji<sup>1</sup> Yi Kui Sui Zhan<sup>3</sup> Shao Jianda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup>Research Center of Laser Fusion, Chinese Academic of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621900, China

**Abstract** Comparing with transmission combination filtering device, only one type of reflection element is presented in optical path of reflecting combination filtering device. The difficulty of design and preparation is largely decreased in the same angular spectrum selectivity. In addition, by comparing the design of coating stacks and the electric field strength, reflecting combination device has higher laser-induced damage threshold (LIDT) than the transmission. Thus, the device plays an important role in preparation and application of the dielectric multilayer film reflecting combination device.

**Key words** optical devices; reflecting combination device; dielectric multilayer film; laser-induced damage threshold

**OCIS codes** 160.2120; 310.0310; 140.3330

## 1 引 言

空间滤波器是大型复杂高功率激光系统中非常重要的器件,具有滤除傅里叶频谱中的高频分量、有效改善光束质量等作用<sup>[1-3]</sup>。按是否对光束进行聚焦,空间滤波器分为聚焦型和非聚焦型。其中,聚焦型中最为典型的结构是针孔滤波器,也是现有激光系统中应用较为广泛的滤波装置。其主要缺点是:易产生等离子体堵孔等现象<sup>[4-5]</sup>;易导致材料出现热致损坏<sup>[6]</sup>;且透镜焦距较长,所占空间较大,不利于系统的紧凑化<sup>[7-9]</sup>。相比以上聚焦型结构,非聚焦型滤波器具有:无透镜、无针孔、光束不聚焦、能承受激光功率高、外形尺寸小等优点。单个滤波器厚度可减小为分米量级(外尺寸约为光束截面的1.5倍)。非聚焦型滤波部件适合装入星载、机载轻小型激光器内。非聚焦型滤波器其性能对整个高功率激光系统有着至关重要的作用,且已经进

收稿日期: 2015-01-15; 收到修改稿日期: 2015-02-03

作者简介: 章 瑛(1982—),女,博士研究生,主要从事Rugate薄膜滤波器的设计、制备和性能方面的研究。

E-mail: zhangying0127@163.com

导师简介: 邵建达(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率激光薄膜、软X射线激光薄膜、激光对光学薄膜破坏机制、超薄膜生长特性、半导体材料特性等方面的研究。E-mail: jdshao@siom.ac.cn

行了一些研究<sup>[10-12]</sup>。滤光片组合器件是非聚焦型滤波器件的类型之一,其实现滤波是通过光谱的高反射到高透射的快速切换,通过空间角度的敏感实现滤波,利用的是元件的反射和透射特性。

本文针对非聚焦型滤波器的特点提出了反射型组合器件,并比较了反射型和透射型滤光片组合器件的优缺点。针对反射元件提出了利用多层介质膜来实现滤波,进行了材料的膜系设计,并对其损伤阈值(LIDT)进行了评估。

## 2 反射型空间滤波的光路设计

反射型组合器件装置如图1所示,沿光路方向各光学元件依次是平面反射镜 $L_1$ ,反射元件 $M_1$ 、 $M_2$ ( $M_1$ 和 $M_2$ 是相同的元件),平面反射镜 $L_2$ 。当水平方向的一束光入射到平面镜 $L_1$ 上, $\theta$ 为 $45^\circ$ ,于是入射角小于 $45^\circ$ 的光以 $\angle A$ 入射到反射截止滤光片 $M_1$ 上,并被反射到 $M_2$ 上(这里假定 $M_1$ 对入射角大于 $45^\circ$ 光透过,对小于 $45^\circ$ 的光反射)。光束以 $\angle B$ 入射到 $M_2$ 上时,由于余角的性质,对 $M_1$ 来说入射角是小于 $45^\circ$ 的,它们相应的关系式如下:

$$\angle A < \theta, \tag{1}$$

$$\angle B = 90^\circ - \angle A. \tag{2}$$

所以这束以 $\angle B$ 入射到 $M_2$ 上的光又被 $M_2$ 过滤掉了,最后就剩下等于 $45^\circ$ 的光反射到平面反射镜 $L_2$ ,最后由 $L_2$ 反射出去,就实现了角谱选择的特性。

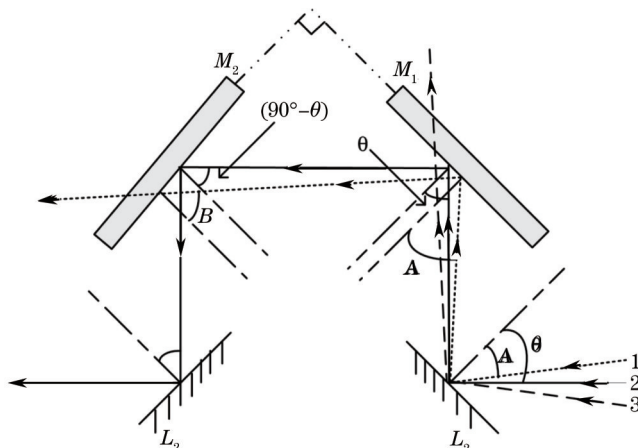


图1 反射型组合器件的示意图(反射镜 $L_1$ 、 $L_2$ 的中心在一条直线上, $L_1$ 与 $L_2$ 垂直放置,反射滤光片 $M_1$ 与 $L_1$ 平行, $M_2$ 与 $L_2$ 平行)

Fig.1 Schematic of experimental setup of reflecting cutoff filter-combination device (reflector mirror  $L_1$  and  $L_2$  are placed vertically,

$L_1$  is placed contrarily with  $L_2$ .  $L_1$ ,  $L_2$  are placed in a straight line,  $M_1$  is parallel to  $L_1$ , and  $M_2$  is parallel to  $L_2$ )

上述反射型组合器件空间滤波器的设计方法表明这种结构在倾斜 $45^\circ$ 入射条件下确实可以起到角谱选择的特性。这里 $M_1$ 和 $M_2$ 是相同的元件,只需要一种反射元件便可以达到角谱选择的目的。而透射型组合器件需要用2种不同的透射元件实现空间滤波,如图2所示。所以反射型组合器件大大降低了设计和制备的难度。

在图2中,沿光路方向各光学元件依次为透射元件 $M_2$ 、 $M_1$ ( $M_2$ 和 $M_1$ 是不同的元件), $M_1$ 与 $M_2$ 平行放置且与水平成 $\theta$ 角。当水平方向的一束光入射到 $M_2$ 上,角度为 $\theta$ ,于是小于 $\theta$ 的光被透射到 $M_1$ 上;当光束入射到 $M_1$ 上时大于 $\theta$ 的光,被 $M_1$ 反射掉了,最后就剩下等于 $\theta$ 的光,这样就达到了角谱选择性的目的。

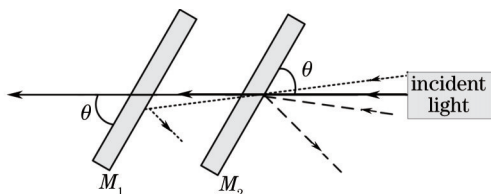


图2 透射型组合器件的示意图

Fig.2 Schematic of transmission cutoff filter-combination device

为了达到空间滤波的目的,反射元件必须具有对角度高反和高透的特性,针对一定的波长,在一定的角度范围内可以实现95%的高反射及95%高透射的转化,因为滤波是通过反射元件边缘的高反和高透快速切

换来实现的。多层介质膜的边缘刚好具有高反和高透的特性并且具有角度的敏感性,所以多层介质膜反射元件成为反射型组合滤波器件中最有潜力的元件之一。

### 3 反射型薄膜元件的设计

对于周期性介质多层膜来说,其反射带有一定的宽度,且反射带位置随着入射角度的变化而变化,利用高反射薄膜固有的反射带边沿位置在入射角度变化时出现的高透射与高反射切换或高反射与高透射切换可以有效设计反射型滤波元件。通过薄膜设计,可实现小角度范围内该波段的高反射及高透射的转化,反射区反射率大于95%,透射区透射率大于95%。因此,该过渡区域的陡峭程度成为确定角度敏感性的关键。与反射带陡度相关的参数有:高低折射率的对比度,反射膜层的周期数目等。高低折射率的对比度越大过渡区域越陡峭,因而膜层对角度更敏感;反射膜层的周期数目的增加使得过渡区域更陡峭程度也随着增加,这可以改善薄膜的角度灵敏性。通常高折射率材料有 $Nb_2O_5(2.20@1053\text{ nm})$ 、 $Ta_2O_5(2.04@1053\text{ nm})$ 、 $HfO_2(1.92@1053\text{ nm})$ 、 $Al_2O_3(1.61@1053\text{ nm})$ ,低折射率材料有 $SiO_2(1.45@1053\text{ nm})$ 。基于在相同的厚度下 $Nb_2O_5$ 的折射率更高带宽更宽,高反与高透过渡边的边带更陡,为此,选择适当高低折射率材料,适当的周期数设计了膜系并进行了优化(在一定的波长范围内,实现反射区反射率大于95%,透射区透射率大于95%)。反射型薄膜元件以高折射率材料 $Nb_2O_5$ 和低折射率材料 $SiO_2$ 设计多层膜结构。由于在倾斜入射 $45^\circ$ 条件下,S分量和P分量相分离,所以选择S分量。由于在中心波长为1053 nm处高反射,给出的高反膜初始膜系为(HL)<sup>33</sup>,为了简单有效地提高反射带附近通带的透射率,必须在膜层的界面处添加匹配层,为了匹配空气跟膜层,还有膜层与基底的折射率,选择优化前后几层,优化后的膜系结构为:1.1393H1.2344L1.1394H0.5048L(HL)<sup>33</sup>0.5052H 1.2342L1.1392H。其物理厚度大约为10  $\mu\text{m}$ ,其厚度示意图如图3所示。

得到其组合光谱曲线如图4所示。图中3条曲线表述了入射角分别为 $44.5^\circ$ 、 $45^\circ$ 和 $45.5^\circ$ 时的光谱曲线图;其中红色的曲线表述的是在中心波长1053 nm处反射率大于99%;黑色的曲线表述的是在中心波长1053 nm处反射率几乎等于100%;蓝色的曲线表述的是在中心波长1053 nm处反射率大于98%。图中可以看出随入射角的增大光谱往短波漂移<sup>[13]</sup>。利用这一特性可以对光谱进行选择。

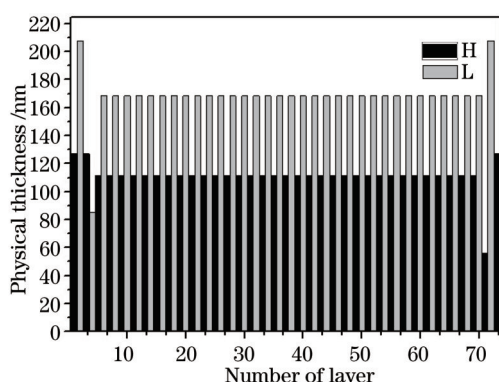


图3 反射型薄膜元件 $Nb_2O_5$ 和 $SiO_2$ 膜系厚度示意图(H代表高折射率材料,L代表地折射率材料)

Fig.3 Reflective films corresponding physical thickness of layers of  $Nb_2O_5$  and  $SiO_2$  (H represents high refractive materials; L represents low refractive materials)

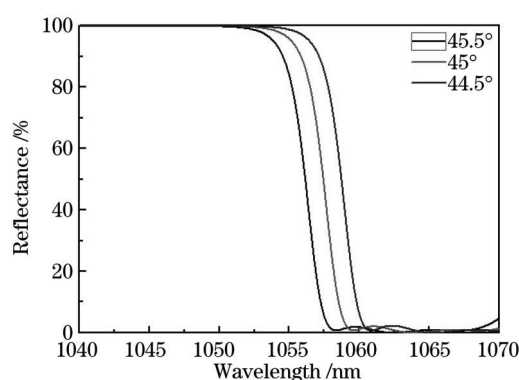


图4 多层介质膜长波通反射滤光片组合器件的光谱图

Fig.4 Reflectance of long wave-pass reflecting cutoff filter-combination device spectral curve with different incident angles

长波通组合器件的角谱曲线如图5所示,电场的分布图如图6所示。以入射电场的振幅为单位1。从图5角谱图可以看出长波通组合角谱的半高宽为 $1.5^\circ$ ,这里定义角谱半高宽为角谱选择性。从图6电场分布图可以看出长波通截止滤光片膜层内部的最大电场为6.5,总厚度在10  $\mu\text{m}$ 左右。

与前面提出的透射型组合器件组合比较,及射型组合器件除了能降低元件要求之外,还有一个重要的方面是中心波长1053 nm处反射电场和透射电场。透射电场如图7所示,从图中可以看出它们的极大值几

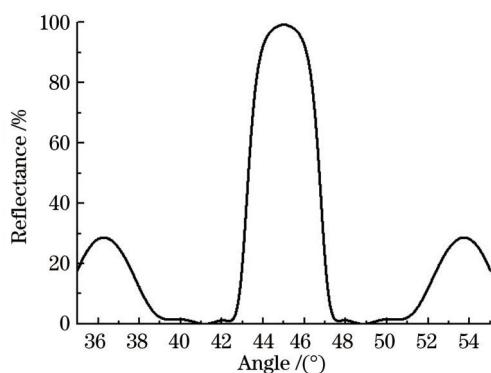


图5 多层介质膜长波通反射滤光片组合器件的角谱图  
Fig.5 Reflectance of long wave-pass reflecting cutoff filter-combination device angular spectral curve

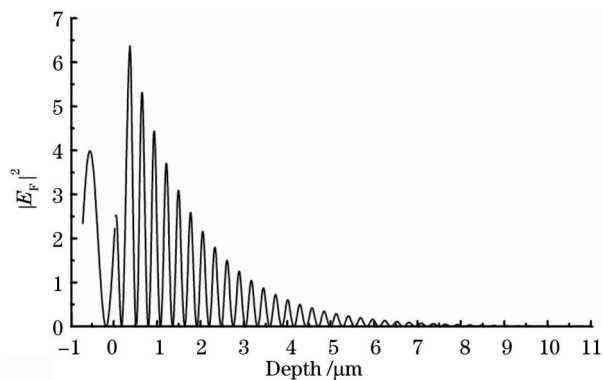


图6 多层介质膜长波通反射滤光片在入射角为45°时的电场图  
Fig.6 Electric-field distribution of long wave-pass reflecting cutoff filter-combination device at oblique angle of incidence of 45°

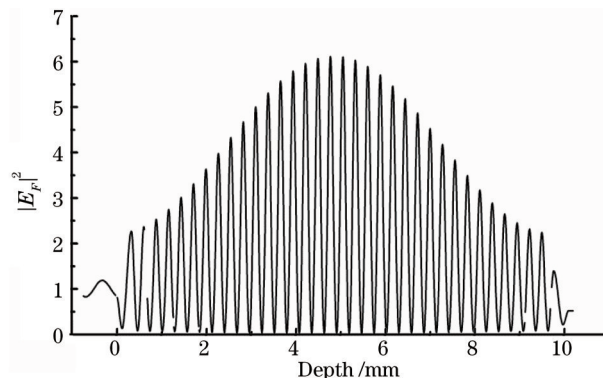


图7 多层介质膜长波通透射滤光片电场图  
Fig.7 Electric-field distribution of transmitting cutoff filter-combination device

乎差不多,但是反射电场的极大值位于膜层表面而透射电场却贯穿于整个膜层的内部,所以相比较于透射电场和反射电场,反射型薄膜元件具有更高的抗激光损伤阈值,更适合于应用到高功率激光系统中。

#### 4 结 论

提出利用反射型组合滤波器件来实现激光光束的空间滤波方案,并给出了具体实现的光路。该光路通过使用两组矢量面相互垂直的反射型元件,利用了余角的性质,分别实现对入射光束在相互正交方向上的空间滤波,从而完成整个光路对入射光束空间滤波的功能。这个光路与透射型组合滤波器件的光路相比,对元件种类的要求降低了一半,从而使设计和制备难度也降低了一半。提出了利用多层介质膜反射元件来实现滤波的设想,由于其具有较高的抗激光损伤阈值,适合于应用到高功率激光系统中。该器件对降低激光系统中的非线性自聚焦效应、缩小系统体积以及提高激光输出功率都具有重要的意义,具有实际的应用价值。

#### 参 考 文 献

- 1 J T Hunt, J A Glaze, W W Simmons, *et al.*. Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging[J]. Appl Opt, 1978, 17(13): 2053-2057
  - 2 Bruno M Van Wonerghem, John R Murray, Jack H Campbell, *et al.*. Performance of a prototype for a large-aperture multipass Nd: glass laser for inertial confinement fusion[J]. Appl Opt, 1997, 36(24): 4932-4953.
  - 3 A K Potemkin, T V Barmashova, A V Kirsanov, *et al.*. Spatial filters for high - peak - power multistage laser amplifiers[J]. Appl Opt, 2007, 46(20): 4423-4430.
  - 4 Wang Fang, Zhu Qihua, Jiang Dongbin, *et al.*. The analysis and control of self-excitation oscillation in multi-pass systems[J]. Laser Journal, 2005, 26(3): 19-20.
- 王 方,朱启华,蒋东宾,等. 多程放大系统中自激振荡的分析和抑制[J]. 激光杂志, 2005, 26(3): 19-20
- 5 Zhang Xin, Yuan Qiang, Zhao Junpu, *et al.*. Characteristics of plasma in spatial filter pinhole of high power laser system[J]. High

- Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(12): 2921–2924.
- 张 鑫, 袁 强, 赵军普, 等. 高功率激光系统空间滤波小孔等离子体特性[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(12): 2921–2924.
- 6 Zhang Xin, Liu Hongjie, Zhao Junpu, *et al.*. Pinhole design of spatial filter in high energy solid-state laser system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47: 111402.
- 张 鑫, 刘红婕, 赵军普, 等. 高功率固体激光系统空间滤波小孔尺寸设计[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47: 111402.
- 7 Liu Hongjie, Jing Feng, Li Qiang, *et al.*. The effect of spatial filter pinhole on output beams quality in high power laser[J]. Journal of Yunnan University, 2005, 27(5A): 184–189.
- 刘红婕, 景 峰, 李 强, 等. 高功率固体激光装置空间滤波器小孔对输出光束质量的影响[J]. 云南大学学报, 2005, 27(5A): 184–189.
- 8 Yanqi Gao, Baoqiang Zhu, Daizhong Liu, *et al.*. Characteristics of beam alignment in high power four-pass laser amplifier[J]. Appl Opt, 2009, 48(8): 1591–1597.
- 9 Yanqi Gao, Baoqiang Zhu, Daizhong Liu, *et al.*. Influences of the alignment and misalignment spatial filters on the beam quality in high power laser systems[J]. Journal of Optics, 2010, 12(9): 095704.
- 10 Zhang Ying, Yi Kui, Qi Hongji, *et al.*. The design of phase-shifted Rugate thin film spatial filter[J]. Chinese J Laser, 2014, 41(10): 1007001.
- 章 瑛, 易 葵, 齐红基, 等. 相移 Rugate 薄膜空间滤波器的设计[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1007001.
- 11 Liu Yanhong, Dong Lijuan, Liu Lixiang, *et al.*. Narrow bandpass angular filter based on anisotropic photonic band gap[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0823001.
- 刘艳红, 董丽娟, 刘丽想, 等. 基于各向异性光子晶体带隙的窄带带通角度滤波器[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0823001.
- 12 Su An, Meng Chengju, Gao Yingjun. Filter with one-dimensional photonic crystal quantum well possessing high-quality filtering functions[J]. Chinese J Laser, 2013, 40(10): 1006001.
- 苏 安, 蒙成举, 高英俊. 实现高品质滤波功能的一维光子晶体量子阱滤波器[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1006001.
- 13 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2007:3.
- 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, 2007: 3.

栏目编辑: 韩 峰