

基于截止滤光片的光束空间低通滤波技术研究

郑光威, 郑秋容, 楚兴春

(空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 由于截止滤光片具有的良好光学特性, 分别给出了基于两片长波通和两片短波通截止滤光片的光束空间低通滤波装置。利用几何光学法, 分别研究了这两种装置对光束的一维空间低通滤波特性, 结果表明: 这两种滤波装置的角谱选择性带宽与滤光片过渡带的带宽以及两滤光片的夹角有关。对于长波通滤光片, 两滤光片的夹角要大于等于截止角度的 2 倍, 而对于短波通滤光片, 两滤光片的夹角要小于等于截止角度的 2 倍, 理论上得出这两种装置的半高宽度的角谱选择性带宽均等于过渡带的宽度结论, 此时两滤光片之间的夹角为截止角度的 2 倍。

关键词: 空间低通滤波; 角谱选择性带宽; 截止滤光片; 长波通; 短波通; 几何光学
中图分类号: O484.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S106004

Low-pass spatial filter for laser beam based on cutoff filters

Zheng Guangwei, Zheng Qiurong, Chu Xingchun

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Due to the fine optical characteristics of cutoff filter, the configurations based on two pieces of long-pass cutoff filter or two pieces of short-pass cutoff filter were put forward respectively. Based on the geometrical optics, the performances of these two configurations were analyzed. The results show that the angular spectrum bandwidths of these two configurations depend on both the intersection angle between the cutoff filters and the angular bandwidth of transition zone. For the long-wave-pass cutoff filter, the intersection angle must be no less than two times of its cutoff angle. While for the short-wave-pass cutoff filter, the intersection angle must be no more than two times of its cutoff angle. Theoretically, its minimum bandwidth is equal to the angular bandwidth of transition zone, when the intersection angle is two times of the cutoff angle.

Key words: low-pass spatial filter; angular spectrum selectivity bandwidths; cutoff filter; long wave pass; short wave pass; geometrical optics

收稿日期: 2016-02-11; 修订日期: 2016-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(61205002)

作者简介: 郑光威(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事基于体光栅、Rugate 薄膜的空间低通滤波技术方面的研究。

Email: zgw198196@126.com

0 引言

光束空间低通滤波装置是激光惯性约束核聚变系统中的重要器件,其主要完成对光束的中高频空间角谱成分的滤波功能,实现光束空域的平滑,使得进入最后点火部分的光束的可聚焦光斑较小,能量集中度高,提升作用于靶丸的场强分布的均匀性,提高试验的成功率^[1-4]。当前光束空间低通滤波装置主要采用的是传统针孔滤波技术,其结构为两透镜同轴共焦放置,且在共焦面处放置一针孔板,其滤波原理为远场滤波方式,即利用透镜对光束进行傅里叶变化,在焦平面处得到该光束的空间角谱分布,利用针孔小板选取所需成分,再利用透镜对其进行逆傅里叶变换,最终得到空间滤波后的光束^[5-8]。该结构由于简单实用而得到广泛应用,然而当其应用于高功率激光系统,尤其是惯性约束聚变系统时,由于其聚焦特性,易产生如下弊端,如:聚焦点附近光强过高易击穿空气,选频针孔板附近易产生等离子体堵孔,或热致损伤选频板而导致滤波失败^[9-13]。尽管针对上述弊端采取了一系列优化措施,如:将针孔滤波系统置于真空管中,采用锥形针孔和抗光损伤阈值较高的选频材料等,一定程度解决了上述弊端^[14-15],但对于更高功率的激光,聚焦型滤波方式仍显得不足,同时聚焦型滤波方式的结构也较为庞大,需要真空环境工作的特性使得其能耗较高,因此需要一种突破性的技术来取代聚焦型滤波方式,实现高功率激光的空间低通滤波。近年来,基于光学薄膜等技术的非聚焦型光束空间低通滤波技术从原理上可解决聚焦型的上述弊端,成为光束空间滤波的研究热点。光学薄膜具有良好的波矢选择性,即良好的光谱选择性(某一角度范围内)和角谱选择性(某一波段范围内),因而其既可以应用于光谱整形、光谱滤波等领域^[16-18],亦可应用于光束空间滤波,然而其用于光谱滤波的研究较多,而应用于空间滤波的研究较少。2005年,Ivan Moreno 提出采用直角棱镜并在其斜面镀有减反射膜的一维空间滤波器^[19]。美国利弗莫尔国家实验室 LLNL 于 2007 年第五届惯性约束聚变科学与应用国际会议上(Inertial Fusion Sciences and Applications, IFSA V 日本神户)提出利用 Rugate Reflector 来取代针孔滤波在国家点火装置 NIF 应用

的设想,以避免聚焦型针孔滤波的不足,但至今没有公开报道其所采用的具体技术方案。国防科学技术大学、中国工程物理研究院和中国科学院上海光学精密机械研究所率先在国内开展基于薄膜的高功率光束空间低通滤波研究,国防科学技术大学和中国工程物理研究院提出基于干涉滤光片以及 Rugate 薄膜的滤波结构^[20],上海光机所章瑛等分别提出基于透射式和反射式的截止滤光片的空间低通滤波结构,指出由于反射型结构采用同种结构的滤光片,因此较透射式采用两片不同结构的滤光片的方式更为简单,在此基础上还优化了薄膜设计,使得薄膜内的光强分布较低,具有较高的抗光损伤阈值,符合高功率条件下的应用,然而其设计的反射型结构,采用的是长波通滤光片,截止角度固定为 45°,两片滤光片以 90°夹角放置^[21],对器件的要求较高,使用时显得不够灵活。通过对截止滤光片的特性分析,文中从几何光学出发,提出并分析了任意截止角度的光束空间低通滤波结构,通过调整两片滤光片的夹角,以实现不同角谱选择性带宽的滤波装置。

1 基于长波通截止滤光片的空间低通滤波光路设计

基于长波通截止滤光片的空间低通滤波装置如图 1 所示。

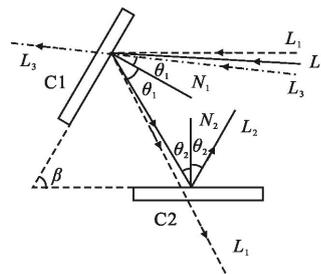


图 1 基于长波通截止滤光片的空间滤波装置

Fig.1 Spatial filtering configuration based on long-wave-pass cutoff filters

图 1 中 C1 和 C2 为同种结构长波通截止滤光片,光学特性相同, N_1 和 N_2 分别表示这两滤光片的前表面法向,是两滤光片的夹角, L_1 、 L_2 、 L_3 分别表示以不同角度入射至该装置的波长相同的光束,且 L_2 与 N_1 夹角为 θ_1 ,其经 C1 反射的光束与 N_2 的夹角为 θ_2 ,由图 1 很容易得出: $\theta_3 = \beta - \theta_1$ 。

对于理想的长波通截止滤光片, 假定其过渡带无限逼近于 0, 截止带内透射效率为 1, 截止带外透射效率为 0, 其对 s 偏振光的光谱透射率和角谱透射率如图 2 所示(文中所有入射光束均为 s 偏振)。

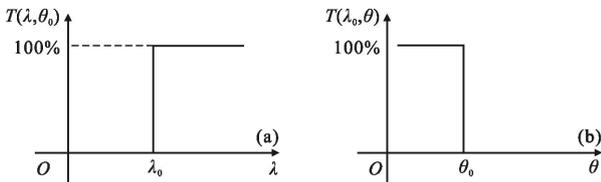


图 2 理想长波通截止滤光片光谱透射率(a)和角谱透射率(b)

Fig.2 Spectrum transmission coefficient (a) and angular transmission coefficient (b) of ideal long-wave-pass cutoff filter

图 2 中 λ_0 和 θ_0 表示截止点处的波长和角度 (由薄膜特性可知, 不同的 λ_0 对应不同的 θ_0), $T(\lambda, \theta_0)$ 表示在入射角为 θ_0 时, 该滤光片的光谱透射率, $T(\lambda_0, \theta)$ 表示在入射光波长为 λ_0 时, 该滤光片的角谱透射率。

图 3 给出了当入射光束以 θ 入射时, 经该装置的透射效率。

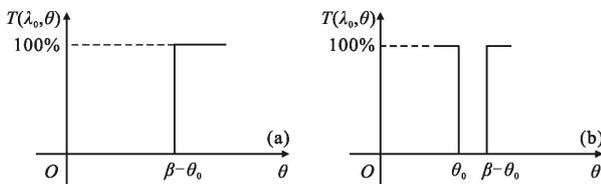


图 3 当 C1 仅为高效率反射透镜时, 该装置的角谱透射率(a)

和当 C1 和 C2 为同一长波通截止滤光片时, 该装置的角谱透射率(b)

Fig.3 Angular transmission coefficients of this configuration when C1 is reflecting coating with high efficiency (a) and when C1 and C2 are the same long-wave-pass cutoff filters (b)

由图 3(b)可知: 当入射角 $\theta \in [\theta_0, \beta - \theta_0]$, 且 $\beta \geq 2\theta_0$ 时, 光束高反, 而当 $\theta < \theta_0$ 或 $\theta > \beta - \theta_0$, 或 $\beta < 2\theta_0$ 时, 光束高透, 此时, 任何光束都不能经 C1 和 C2 同时高效率反射出该装置。

由图 1 所示, 当波长为 λ_0 的光束 L_1 、 L_2 和 L_3 分别以大于 θ_0 、等于 θ_0 和小于 θ_0 角度入射至滤光片 C1 时, 由于 C1 对波长为 λ_0 的光束的截止角度为 θ_0 , 则光束 L_3 高透, 而光束 L_1 和 L_2 高反。取 β 等于 $2\theta_0$, 此时 L_1 和 L_2 分别以小于 θ_0 和等于 θ_0 的角度入射至滤光片 C2, 由于 C2 与 C1 是同种截止滤光片,

光学性质完全相同, 其对波长为 λ_0 的光束的截止角度也为 θ_0 , 此时光束 L_1 高透, L_2 高反, 因此该装置具有对光束一维空间低通滤波的效果。该装置的角谱选择性带宽为 $\beta - 2\theta_0$, 中心角度为 $\beta/2$, 为了减小该装置的角谱选择性带宽可以将两滤光片的夹角无限逼近于其截止角度的两倍。

实际应用中, 不可能制作出过渡带 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\theta$ 无限逼近于 0 的滤光片, 对于一般的长波通截止滤光片, 假定该滤光片的过渡带角谱宽度为 $\theta_{01} - \theta_{02}$, 其角谱透射率及该滤波装置的角谱透射率如图 4 所示。

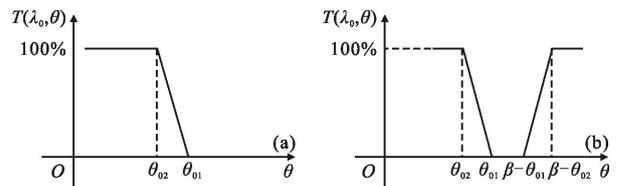


图 4 长波通截止滤光片 C1 的角谱透射率(a)经该装置的角谱透射率(b)

Fig.4 Angular transmission coefficients of long-wave-pass cutoff filter C1 (a) and that of the configuration (b)

由图 4(b)可知, 当 $\beta \geq 2\theta_{01}$, 且入射角 $\theta \in [\theta_{01}, \beta - \theta_{01}]$ 时, 光束经该装置的反射率为 100%, 当 $\theta \in [\theta_{02}, \theta_{01}] \cup [\beta - \theta_{01}, \beta - \theta_{02}]$ 时, 光束部分反射, 当 $\theta < \theta_{02}$ 或 $\theta > \beta - \theta_{02}$ 时, 光束高透; 当 $\beta \in (2\theta_{02}, 2\theta_{01})$ 时, 光束达不到 100% 反射的条件; 当 $\beta < 2\theta_{02}$ 时, 光束高效率透射。因此在实际应用时, 为使得光束有部分能达到该装置的最大反射效率, 必须要保证 $\beta \geq 2\theta_{01}$, 此时, 该装置的角谱选择性带宽为 $\beta - \theta_{01} - \theta_{02}$ (定义反射率下降为最大值一半时的角谱宽度), 中心角度为 $\beta/2$ 。因此, 在确保中心角谱成分最高效率反射出该装置的前提下, 该装置的最小角谱选择性带宽为 $\theta_{01} - \theta_{02}$ (此时 $\beta = 2\theta_{01}$), 因而在实际应用中, 需要设计过渡带较窄, 且截止带内透射率较高, 截止带外反射率较高的滤光片, 尤其在对角谱选择性带宽使用要求较高的场合, 如: 在惯性约束核聚变系统所要带到的亚毫弧度量级的滤波带宽, 要求过渡带必须要达到小于亚毫弧度量级的要求。对于实现光束的二维空间低通滤波功能, 采用同类型的另一套装置, 搭建合适的光路即可实现。

2 基于短波通截止滤光片的空间低通滤波光路设计

基于短波通截止滤光片的空间低通滤波装置如

图 5 所示。

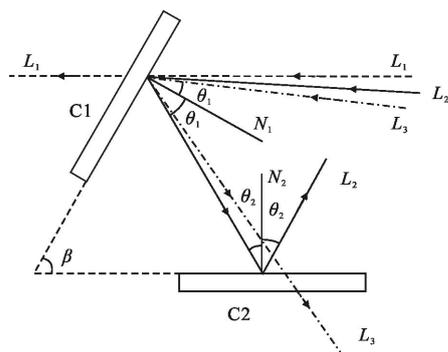


图 5 基于短波通截止滤光片的空间滤波装置

Fig.5 Spatial filtering configuration based on short-wave-pass cutoff filters

图 5 中各参量的定义与图 1 相同。与基于长波通截止滤光片的低通滤波装置的研究思路一致,直接分析了基于一般情况下的短波通截止滤光片装置的一维空间低通滤波特性。图 6 给出了滤光片 C1 的角谱透射率及该滤波装置的角谱透射率。

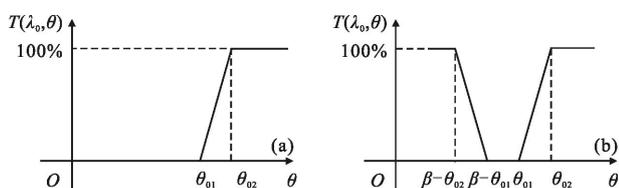


图 6 (a)短波通截止滤光片 C1 的角谱透射率(b)经该装置的角谱透射率

Fig.6 Angular transmission coefficients of short-wave-pass cutoff filter C1 (a) and that of the configuration (b)

图 6 中各参量的定义与图 4 相同。由图 6(b)可知,当 $\beta \leq 2\theta_{01}$, 且入射角 $\theta \in [\beta - \theta_{01}, \theta_{01}]$ 时,光束经该装置的反射率为 100%, 当 $\theta \in [\beta - \theta_{02}, \beta - \theta_{01}] \cup [\theta_{01}, \theta_{02}]$ 时,光束部分反射,当 $\theta < \beta - \theta_{02}$ 或 $\theta > \theta_{02}$ 时,光束高透;当 $\beta \in (2\theta_{01}, 2\theta_{02})$ 时,光束达不到 100% 反射的条件;当 $\beta > 2\theta_{02}$ 时,光束高效率透射。因此在实际应用时,为使得光束有部分能达到该装置的最大反射效率,必须要保证 $\beta \leq 2\theta_{01}$, 此时,该装置的角谱选择性带宽为 $\theta_{01} + \theta_{02} - \beta$ (定义反射率下降为最大值一般时的角谱宽度), 中心角度为 $\beta/2$ 。因此,在确保中心角谱成分最高效率反射出该装置的前提下,该装置的最小角谱选择性带宽为 $\theta_{02} - \theta_{01}$ (此时 β 等于 $2\theta_{01}$)。与长波通截止滤光片一样,在实际应用中,需要设计过

渡带较窄,且截止带内透射率较高,截止带外反射率较高的滤光片,才能使得其具有较好的空间低通滤波效果。

3 结论

由对分别基于长波通和短波通截止滤光片的光束空间低通滤波装置的设计以及光路分析,可以看出它们实际应用于空间滤波的需注意以下三点:一是滤光片过渡带尽可能地接近于理想情况,即过渡带宽度尽量接近于 0,以减小该装置角谱选择性带宽的极限最小值;二是截止带内的透射率要较高,最好能接近于 100%,而截止带外的反射率要较高,以确保待滤除角谱成分高效率透射,而有用角谱成分被高效率反射;三是两滤光片的夹角要满足相应的条件,如对于长波通滤光片,两滤光片的夹角要大于等于截止角度的 2 倍,而对于短波通滤光片,两滤光片的夹角要小于等于截止角度的 2 倍。实际上,可以对上述装置进行推广,只要是存在陡峭边沿的滤光片,都可以采用该装置以对一定的光束进行空间滤波,如可以利用两片带通滤波片,采用不同的陡峭边沿,搭建与图 1 或图 5 装置相同的光路实现低通滤波的功能,因此文中提出的滤波装置的应用范围较广,不局限于必须要使用截止滤光片才能使用。

文中没有具体分析如何实现具有陡峭边沿的截止滤光片,与任何薄膜设计的思路一样,这部分内容可以采用两种思路进行实现:一是采用局部优化法,即对一般常用结构的截止滤光片进行局部优化,以满足实际应用的需要;另一种是采用全局优化的办法,即通过角谱透射率来直接求得膜系的分布,常用的算法有针尖算法等,此外还可加入膜内光强分布的最大值等限定条件一并考虑。

国内中国科学院上海光学精密机械研究所章瑛等报导采用截止滤光片来实现高功率光束空间低通滤波的装置,但该装置限定采用长波通的截止滤光片,截止角度为 45° ,且两滤光片的夹角为 90° 。该技术最大的优势即通过优化设计,可使得滤光片膜内的光场的最大值较待滤波光束可设计在同一量级,因此较干涉滤光片等方法抗光损伤阈值较高,尤其当滤光片采用 Rugate 薄膜时,抗光损伤阈值可进一步提高。文中在此基础上,推出了更一般的模型,以期对该领域的研究人员有所启发。

参考文献:

- [1] John T Hunt. National ignition facility performance review 1999 [R]. California: University of California Livermore, 2000.
- [2] Haynam C, Wegner A P J, Auerbach J M, et al. National ignition facility laser performance status [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276–3303.
- [3] John Caird, Vivek Agrawal, Andy Bayramian, et al. Nd: glass laser design for laser ICF fission energy (LIFE) [J]. *Fusion Science and Technology*, 2009, 56: 607–617.
- [4] Burkhart S C, Bliss E, Nicola P Di, et al. National ignition facility system alignment [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(8): 1136–1157.
- [5] Liu Daizhong, Lu Fengnian, Cao Jinzhou, et al. Design and application of a laser beam alignment system based on the imaging properties of a multi-pass amplifier [J]. *Chinese Optics Letters*, 2006, 4(10): 601–604.
- [6] Potemkin A K, Barmashova T V, Kirsanov A V, et al. Spatial filters for high-peak-power multistage laser amplifiers [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(20): 4423–4430.
- [7] Bonghoon Kang, Joo Gi-Tae, Bum Ku Rhee. Optimization of the input fundamental beam by using a spatial filter consisting of two apertures [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2010, 56(1): 325–328.
- [8] Chen Huaixin, Peng Yaochang, Cheng Jin. Propagation of laser beam with amplitude modulations and phase aberrations through spatial filter–image relaying system [J]. *Journal of Sichuan University*, 2001, 38(6): 848–851. (in Chinese)
陈怀新, 彭耀昌, 程进. 振幅调制与位相畸变光束通过空间滤波–像传递系统的传输 [J]. *四川大学学报*, 2001, 38(6): 848–851.
- [9] 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. (in Chinese)
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.
- [10] Wang Fang, Su Jingqin, Wang Wenyi, et al. Parasitic oscillation in high power laser facility with multi-pass-cavity amplification [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(8): 1183–1186. (in Chinese)
王方, 粟敬钦, 王文义, 等. 内腔四程放大高功率激光系统寄生振荡 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(8): 1183–1186.
- [11] 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. (in Chinese)
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.
- [12] Gao Yanqi, Zhu Baoqiang, Liu Daizhong, et al. Characteristics of beam alignment in high power four-pass laser amplifier [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(8): 1591–1597.
- [13] Gao Yanqi, Zhu Baoqiang, Liu Daizhong, 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: 095704–1–095704–9.
- [14] Peter M Celliers, Kent G Estabrook, Russell J Wallace, et al. Spatial filter pinhole for high-energy pulsed lasers [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(12): 2371–2378.
- [15] James E Murray, David Milam, Charles D Boley, et al. Spatial filter pinhole development for the national ignition facility [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(9): 1405–1419.
- [16] Lawrence Domash, Ming Wu, Nikolay Nemchuk, et al. Tunable and switchable multiple-cavity thin film filters [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 126–135.
- [17] Sahoo N K. New Generation optical nanometric multilayer interference coatings: the emerging dimensions [C]//AIP Conference Proceedings, 2010, 1313: 65–69.
- [18] Quarrie L. Theoretical simulations of protective thin film Fabry–Perot filters for integrated optical elements of diode pumped alkali lasers (DPAL) [J]. *AIP Advances*, 2014, 4: 097107.
- [19] Ivan Moreno, J Jesus Araiza, Maximino Avendano-Alejo. Thin-film spatial filters [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(8): 914–916.
- [20] Zheng Guangwei. Research on the non-focusing low-pass spatial filter for high power laser beam [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
郑光威. 高功率激光非聚焦型空间低通滤波技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [21] Zhang Ying, Qi Hongji, Yi Kui, et al. Analysis of the spatial filter of a dielectric multilayer film reflective cutoff filter–combination device [J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(10): 104216.