

非聚焦型光束空间低通滤波技术研究进展

郑光威 楚兴春 郑秋容

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

摘要 激光光束空间低通滤波技术是提高光束空域质量的重要手段之一。随着高能激光技术的进一步发展,传统的针孔滤波技术因其对光束的聚焦特性,已逐渐成为限制高能激光光束空域质量提高的瓶颈,因此,不对光束聚焦即可实现光束空域质量的改善成为突破该瓶颈的创新型技术。体光栅、多层介质薄膜、Rugate 薄膜和光子晶体因具有良好的波矢选择特性,已成为当前实现非聚焦型光束空间低通滤波的主流技术和研究热点。分别从这 4 种光学元件入手,简要分析了体光栅的布拉格衍射特性、多层介质薄膜和 Rugate 薄膜对光束的相长相消干涉特性,以及利用光子晶体的自准直效应来实现非聚焦型光束空间低通滤波的主要技术特点,综述了这 4 种技术在光束空间低通滤波应用中的研究进展。和针孔滤波技术的聚焦特性相比,这 4 种技术的非聚焦滤波特性具有取代针孔滤波的可行性,尤其是在对高功率激光进行空间低通滤波的应用中。

关键词 信号处理;光束空间低通滤波;非聚焦;体光栅;多层介质薄膜;Rugate 薄膜;光子晶体

中图分类号 TN29 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.050002

Development of Non-Focusing Low-Pass Spatial Filtering for Laser Beams

Zheng Guangwei Chu Xingchun Zheng Qiurong

School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China

Abstract Low-pass spatial filtering for laser beams plays a key role in improving spatial quality of beams. With the development of high power laser beams, the traditional pinhole spatial filtering becomes a bottleneck to enhance the beam spatial quality, due to its focusing characteristics. Low-pass spatial filtering without focusing is an innovative technique, which can break the bottleneck and improve the spatial quality of beams. Volume grating, multi-layer film, Rugate coating, and photonic crystal have been the main techniques and research focuses to realize the non-focusing spatial filtering for laser beams because of their fine wave vector selectivity. Bragg diffraction of volume grating, constructive and destructive interference of multi-layer and Rugate coatings, and self-collimating of photonic crystal are described to analyze their spatial filtering performance, respectively. The research status of these four techniques for spatial filtering is reviewed. The four techniques can be a substitute for pinhole spatial filtering, especially in the field of high power laser beams.

Key words signal processing; low-pass spatial filtering for laser beams; non-focusing; volume grating; multi-layer dielectric film; Rugate coating; photonic crystal

OCIS codes 070.6110; 090.7330; 310.6845

1 引言

高功率激光在工业加工、惯性约束核聚变和国防军事等领域得到了广泛应用。其中,激光光束空域质量的好坏直接决定其具体应用的成败^[1-10]。提高激光光束空域质量的方法按照是否需要光束进行聚焦,可分为聚焦型和非聚焦型两种,聚焦型为远场滤波方式,典型结构如针孔滤波的 $4f$ 系统^[11-16],而非聚焦型为

收稿日期: 2015-11-24; **收到修改稿日期:** 2015-12-30; **网络出版日期:** 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(61205002)

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

E-mail: zgw198196@126.com

近场滤波方式,无需对光束进行远场变化,即可实现光束空间滤波。由于聚焦型滤波方式的焦点处光强过高,尤其是在高功率激光空间滤波领域,该方式易产生弊端,如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^[17-23]。尽管针对上述弊端有一系列优化措施,如将 $4f$ 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,以及圆柱形空间滤波器等,这些可以在一定程度上解决上述弊端^[24-27],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。

非聚焦型光束空间低通滤波技术解决了聚焦型技术的上述弊端,成为近年来光束空间滤波的研究热点。实现非聚焦型光束空间低通滤波的技术途径主要有两种:1)采用具有较好角谱选择性的光学周期(准周期)性结构,如体光栅、多层介质薄膜、Rugate薄膜等^[28-45];2)采用具有特殊光学性质的材料或结构,如负折射率材料、光子晶体和晶体的旋光性结构等^[46-48]。

本文按照实现非聚焦型光束空间低通滤波的主要技术手段,综述了基于体光栅、多层介质薄膜、Rugate薄膜、光子晶体这4种途径的空间低通滤波技术的滤波原理和研究进展,并对比了它们的优缺点,指出下一阶段可能的研究重点和方向。

2 基于体光栅的光束空间低通滤波技术

2.1 空间滤波原理

体光栅是折射率随光栅矢量周期或准周期变化的光学元件,按照衍射光束和入射光束在光栅的两侧或同侧可分为透射型体光栅(TVG)和反射型体光栅(RVG),其实现滤波的主要原理是利用布拉格衍射特性(相长干涉或相消干涉)来实现低频角谱和高频角谱的空间分离。图1给出了TVG和RVG对单色平面波的衍射示意图^[49]。

图1中 k_0 表示入射单色平面波的波矢; k_T 和 k_{TS} 分别表示经TVG的透射和衍射平面波波矢; k_R 和

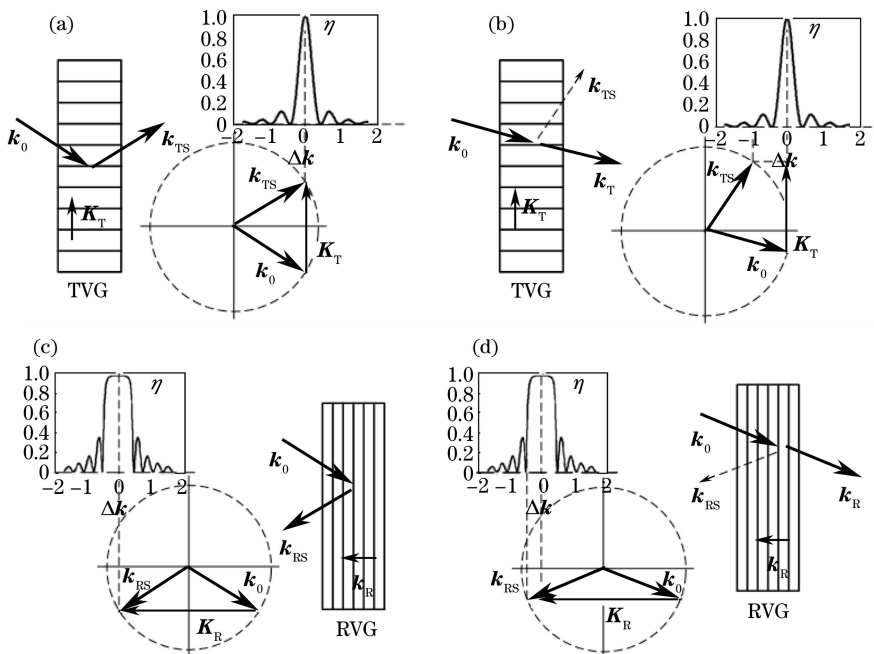


图1 体光栅对单色平面波的衍射示意图。(a)波矢满足TVG布拉格条件时的衍射;(b)波矢不满足TVG布拉格条件时的衍射;(c)波矢满足RVG布拉格条件时的衍射;(d)波矢不满足RVG布拉格条件时的衍射

Fig. 1 Diffraction schematics of monochromatic plane wave by volume grating. (a) Central wave vector satisfies TVG Bragg law; (b) central wave vector does not satisfy TVG Bragg law; (c) central wave vector satisfies RVG Bragg law; (d) central wave vector does not satisfy RVG Bragg law

k_{RS} 分别表示经 RVG 的透射和衍射平面波波矢; K_T 和 K_R 分别表示透射型和反射型体光栅的光栅矢量; η 表示衍射效率; 透射型与反射型体光栅的布拉格条件分别为 $k_{TS} - k_0 = K_T$ 和 $k_{RS} - k_0 = K_R$; Δk 表示偏离布拉格条件的波矢偏移量, 对透射型和反射型体光栅其表达式分别为 $\Delta k = k_{TS} - k_0 - K_T$, $\Delta k = k_{RS} - k_0 - K_R$ 。

从图 1 可以看出, 利用体光栅的布拉格衍射特性, 选择合适的光栅参量, 使得低频角谱成分满足布拉格条件(相长干涉), 而高频角谱成分不满足布拉格条件, 即可实现低频角谱成分和高频角谱成分的空间分离, 在光束近场实现空间滤波的功能。

2.2 研究进展

体光栅良好的光谱和角谱选择性, 使其在众多领域得到广泛应用, 如光束合成、光束偏转、光脉冲整形、光谱滤波、光互连、半导体或固体激光器光束质量的优化以及光束空间滤波等^[50-65]。早在 20 世纪 70 年代末, 体光栅由于其可控的角谱选择性, 被广泛应用于图像处理中^[66-68]。20 世纪 90 年代中期, Ludman 等^[69-71]首次提出非聚焦型空间低通滤波概念——Non-spatial filter, 随后完成了部分低通滤波的验证工作。顾名思义, Non-spatial Filter 装置中无透镜、无针孔, 在滤波过程中光束不聚焦, 且体光栅的平板结构有利于缩小空间滤波器的体积并减轻整套滤波装置的重量, 且利于星载或机载高能激光系统的使用。然而, 研究只提出了基于透射型体光栅的空间低通滤波技术方案, 且只是间接地验证了透射型体光栅具有空间低通滤波特性, 如采用锥形光束照射透射型体光栅, 会在衍射方向观察到一条明显的亮条纹, 并未定量实验分析其对畸变光束经空间低通滤波后光束质量的提高, 以及衍射旁瓣对透射型体光栅空间低通滤波的影响。

在出现基于体光栅的非聚焦型空间滤波创新性概念的次年, 首都师范大学定性分析了该滤波器的空间滤波原理^[72]。上海光学精密机械研究所将体光栅插入各种激光腔中进行角谱选择, 改善光束空间质量^[73]。国防科学技术大学系统地分析了体光栅的空间低通滤波特性, 报道了畸变光束的一维以及二维空间低通滤波效果^[30-34]。华中科技大学、苏州大学详细分析了透射型体光栅的衍射特性, 针对透射型体光栅的衍射旁瓣会降低滤波效果这一问题, 张翔^[35]提出串联级联型结构来降低这种影响; 针对透射型体光栅兼具的光谱选择性而限制其对超短脉冲激光滤波的特性, Shang 等^[39]提出了单片透射型体光栅和两片面光栅的组合结构, 如图 2 所示。

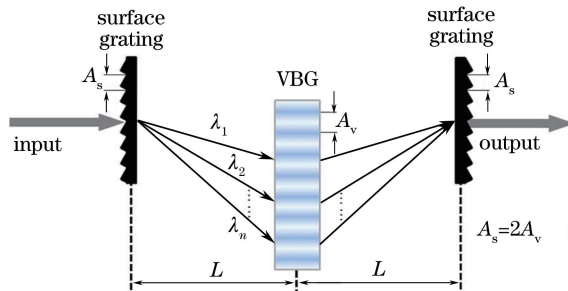


图 2 体光栅与面光栅的组合结构

Fig. 2 Configuration of volume grating and a pair of surface gratings

图 2 中透射型体光栅左右两侧的面光栅可分别实现脉冲光束的分路和合路功能, 体光栅完成空间滤波, 通过这种组合结构实现超短脉冲光束的空间低通滤波, 实验部分验证了该结构的空间滤波特性。随着记录体光栅的材质的不断发展, 如光热折变玻璃的成功研制, 该材料在可见光及近红外波段具有非常高的抗光损伤阈值^[74-75], 因此由光热折变玻璃记录的体光栅具有一定的应用前景。

3 基于多层介质薄膜的光束空间低通滤波技术

3.1 空间滤波原理

多层介质薄膜是折射率随薄膜厚度方向呈阶跃性变化的薄膜。按照薄膜的光学特性, 可分为增透膜、高反膜和带通滤光片等。图 3 和图 4 分别给出了高反射膜相长干涉高效率反射以及带通滤光片相消干涉高效率透射示意图^[76]。

从图 3 可以看出, 高反射膜使得低频角谱成分满足相长干涉的条件, 而高频角谱成分不满足, 实现了光束的空间低通滤波要求。带通滤光片的滤波思路与高反膜相反, 从图 4 可以看出, 带通滤光片使得低频角谱

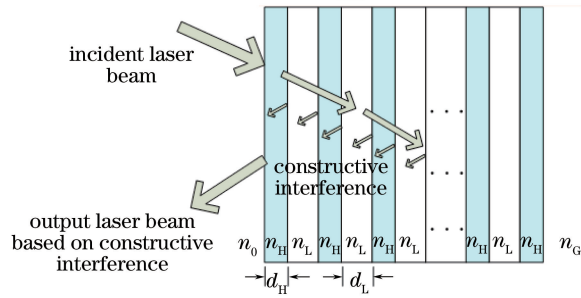


图3 高反射膜相长干涉高效率反射示意图

Fig. 3 Schematic of highly efficient reflectance based on constructive interference of antireflection coating

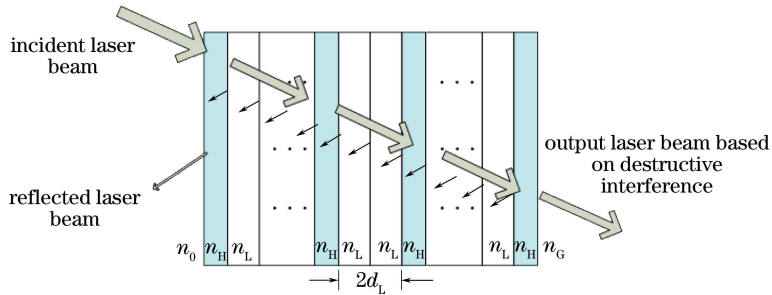


图4 带通滤光片相消干涉高效率透射示意图

Fig. 4 Schematic of highly efficient transmittance based on destructive interference of bandpass filter

成分相消干涉且高效率透射,而对高频角谱成分高效率反射,以达到低频与高频角谱成分空间分离的目的。对于这两种结构的薄膜,当采用光束正入射时,即可实现光束的二维空间低通滤波。未采用这种结构的主要原因在于:当光束正入射时,这两种结构的光谱选择性带宽与角谱选择性带宽均近似呈平方正比关系,当要求角谱选择性带宽达到毫弧度或亚毫弧度量级时,光谱选择性带宽会变得非常窄,直接影响了待滤波光束的光谱分布,引起时域波形的畸变;当光束斜入射时,这两种结构的光谱选择性带宽与角谱选择性带宽近似呈正比关系,并且通过膜系设计、可以达到在较窄角谱选择性的条件下,光谱选择性带宽较宽,因此在一般条件下,选择斜入射的情况。针对斜入射出现的s光和p光透射和反射特性不一致以及透、反射旁瓣,可以优化薄膜结构加以解决。

3.2 研究进展

多层介质薄膜主要应用于光谱整形、光谱滤波领域^[77-79],在空间低通滤波方面的研究不多。Moreno等^[40,80]提出利用直角棱镜并在其斜面镀有减反射膜的一维空间滤波器,如图5所示,图中T和R分别表示透射和反射。

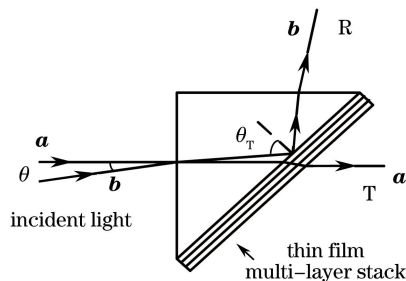


图5 减反射膜和直角棱镜组成的空间滤波装置

Fig. 5 Spatial filtering configuration constituted by an antireflection coating and a prism

该滤波器针对s偏振光与p偏振光,分别采用了S|LHLHL|Air和S|HLHLH|Air的5层薄膜结构,S表示基底材料。其主要工作原理为利用棱镜和减反射膜的组合结构对高频角谱成分全反射,而对低频角谱成分高透射,以达到空间低通滤波的目的。从图5可以看出,该滤波装置只对纸面内波矢a下方的波矢成

分具有高反射特性,因此该装置只具有一维单边空间低通滤波性能。采用4组该滤波装置,用串联级联的方式,才能使其具有二维空间低通滤波性能。该滤波器具有特殊的应用背景,主要应用于天文观测领域,可滤除已知星体的高亮度背景干扰,探测未知星体^[40,80]。

国内大部分科研单位均研究了多层介质薄膜的光谱选择特性及其应用^[81-84],而针对多层介质薄膜的光束空间低通滤波特性研究不多。中山大学于2004年利用通过串联级联两个全介质带通滤波光片的薄膜结构,设计了兼具光谱及角谱滤波双重性能的光学器件,该结构的光谱选择性非常好,但角谱选择性较弱^[85]。随后,2006年利用两片间隔层不同的单腔带通滤波光片组成双腔结构,设计了具有多通道窄带光谱滤波以及角谱滤波功能的器件,该器件主要用于多通道太空或大气光通信,但该器件在光束垂直入射条件下使用时角谱选择性较弱^[86-87]。浙江大学利用带通滤波光片设计了可调谐的空间解复用器件,主要应用于波分复用领域,对带通滤波光片空间低通滤波技术未作深入研究^[88-89]。国防科学技术大学根据高功率激光器空间滤波的需求,开展了多层介质薄膜的空间低通滤波特性研究,重点研究了高反射膜以及单腔和多腔带通滤波光片的空间低通滤波特性,得出了多腔带通滤波光片具有较好空间滤波特性的结论,角谱选择性带宽可达亚毫弧度量级^[76]。上海光学精密机械研究所章瑛等^[41-43]开展了多层反射膜对光束空间低通滤波特性的研究,提出了透射型组合器件和反射型组合器件的滤波结构,分别如图6和图7所示。

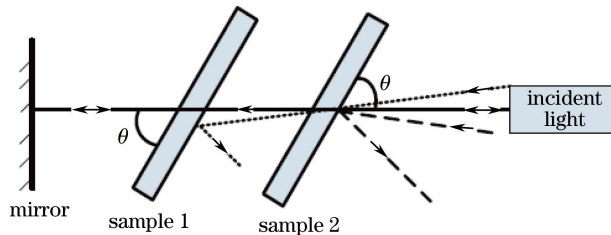


图6 透射型组合器件示意图

Fig. 6 Schematic of transmitting configuration constituted by two pieces of cascaded edge filters

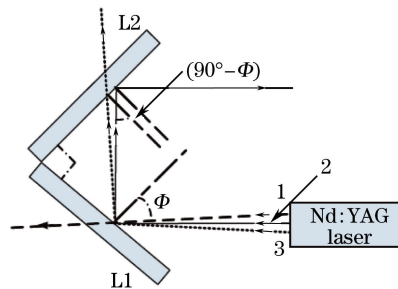


图7 反射型组合器件示意图

Fig. 7 Schematic of reflecting configuration by two pieces of cascaded edge filters

图6中sample 2对入射角小于等于 θ 的光高透射,对入射角大于 θ 的光高反射,而sample 1对入射角大于等于 θ 的光高透射,对入射角小于 θ 的光高反射,因此这种组合结构可实现一维光束空间低通滤波效果,且对比多腔带通滤波片,该结构的抗光损伤阈值较高,适合高功率激光的使用。图7中L1和L2是相同结构的薄膜,对入射角大于等于 $\pi/4$ 的光高反射,对入射角小于 $\pi/4$ 的光高透射,采用L1和L2相互垂直放置的结构,巧妙地使用同一结构的两块薄膜即可实现光束的一维空间低通滤波,实现难度较透射型装置可降低50%。通过优化设计,对于波长为1064 nm的激光,反射型组合结构中的膜内光强最大值仅为未滤波光束光强最大值的4倍,滤波带宽为0.07 rad^[43]。进一步探究该设计的基本思想,可以得出,采用两片同样结构的截止角度为 α 的低通截止滤光片,当这两片滤光片以 β 角度放置,且 $\beta \geq 2\alpha$ 时,该结构具有一维空间低通滤波特性,其滤波中心角度为 $(\beta - 2\alpha)/2$,带宽为 $\beta - 2\alpha$,理论上可以设计任意角谱选择性带宽的滤波器,此时 2α 无限接近于 β ,但由于实际制作工艺等原因,很难实现亚毫弧度量级的角谱选择性带宽的制作和应用,这种结构适用于对角谱选择性要求不高的高功率激光非聚焦型空间低通滤波应用。对于更窄的角谱

选择性带宽,需要选择其他的结构或设计思想来制作和实现。

4 基于 Rugate 薄膜的光束空间低通滤波技术

4.1 空间滤波原理

Rugate 薄膜是一种折射率随薄膜厚度呈连续性周期变化的薄膜,其滤波原理与反射型体光栅类似,区别仅在于 Rugate 薄膜是以镀膜手段来制备,而体光栅一般是用全息法来制作。图 8 给出了普通正弦 Rugate 薄膜空间低通滤波示意图^[76]。

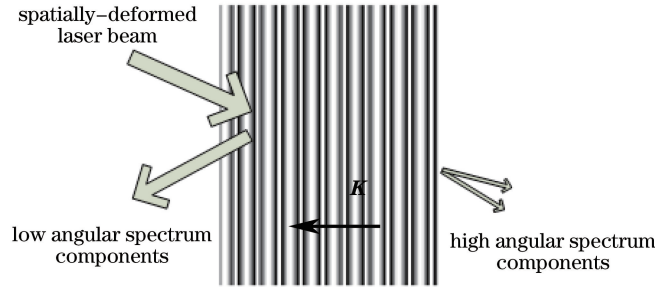


图 8 普通正弦 Rugate 薄膜的空间低通滤波示意图

Fig. 8 Schematic of low-pass spatial filtering by normal sinusoidal Rugate coatings

从图 8 可以看出,普通正弦 Rugate 薄膜与非倾斜反射型体光栅的空间低通滤波原理一致,即利用低频角谱成分满足布拉格条件、被高效率反射,而高频角谱成分不满足布拉格条件、被高效率透射,从而实现低频角谱成分和高频角谱成分的空间分离。

4.2 研究进展

Rugate 薄膜也是薄膜的一种类型,和传统的多层介质薄膜相比,前者折射率分布随膜层厚度连续变化,而后者为折射率周期性阶跃变化。传统的多层介质薄膜存在高、低折射率膜层之间附着力较差、应力较大且有高级次光谱反射带等缺点。20 世纪 80 年代 Rugate 薄膜新概念被提出^[90-92],不仅成功地克服了多层介质薄膜的上述缺点,且具有设计灵活、抑制光谱旁瓣以及抗光损伤阈值更高的优势,因此受到薄膜设计者的青睐^[93-94]。

20 世纪 80 年代出现了一系列 Rugate 薄膜技术的初期成果^[90-92,95-96]。过去三十多年间,该领域的技术进步主要体现在 Rugate 薄膜的制备工艺,以及在光谱整形、光谱滤波等方面的应用,而空间滤波的应用报道并不多^[97-101]。乌克兰、德国和土耳其研究者得到欧盟的资助,于 2009 年联名发表论文,报道了一维 Rugate 薄膜在宽带和窄带空间滤波中的应用^[102]。美国利弗莫尔国家实验室于 2007 年提出利用 Rugate 反射镜来取代针孔滤波在国家点火装置中的应用,以避免聚焦型针孔滤波的不足,但至今没有公开报道所采用的具体技术方案。

2010 年,湖南大学 Luo 等^[44]提出具有二维空间低通滤波特性的 Rugate 薄膜,该薄膜结构为折射率高斯切趾分布,受限于镀膜工艺,角谱选择性带宽较宽。国防科学技术大学分析了普通 Rugate 薄膜、切趾 Rugate 薄膜、啁啾 Rugate 薄膜以及相移 Rugate 薄膜的透射和反射特性。为进一步降低薄膜的角谱选择性带宽,改善光束低通滤波效果,提出利用相移 Rugate 薄膜实现光束空间低通滤波,并给出了串联两层该种薄膜来实现光束二维空间低通滤波的结构,该结构的滤波装置角谱选择性带宽可达到亚毫弧度量级,如图 9 所示^[76]。

章瑛等^[45]分析了该结构的角谱选择性带宽随薄膜厚度变化的规律,并重点研究了相移 Rugate 薄膜的随机误差、膜内驻波场特性。结果表明,该结构的膜内驻波场光强较高,光强最大值发生在折射率相移处,比待滤波光束光强最大值高了三个量级,不利于高功率激光的应用。通过研究膜内驻波场的光强随折射率调制度和 Rugate 薄膜厚度的变化,可以发现 Rugate 薄膜的膜内驻波场随着折射率调制度降低呈减小的趋势。仿真结果表明,当折射率调制度达到 0.001,薄膜厚度为 1 mm 时,对 1064 nm 光束膜内驻波场的最大值仅为未滤波光束光强最大值的 6 倍,在现有镀膜水平下,制备这样的薄膜较难,但通过对该结构的分析,可以看出两片反射型体相位光栅的串联结构所组成的法布里-珀罗腔可达到同样的效果,并且这种结构已实现了光谱滤波的应用^[103]。同时由于两片反射型体相位光栅中间为空气层,其抗光损伤能力可进一步提高,因此在现有条件下,可采用该结构实现对角谱选择性要求较高和抗光损伤阈值较高的光束空间低通滤波的应用。

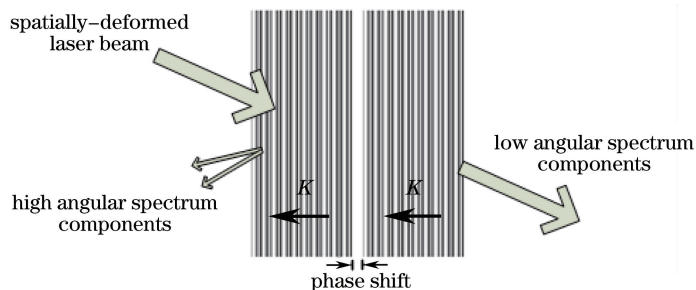


图9 相移 Rugate 薄膜的空间低滤波示意图

Fig. 9 Schematic of low-pass spatial filtering by phase-shifted Rugate coatings

5 基于光子晶体的光束空间低滤波技术

5.1 空间滤波原理

光子晶体是介电常数在空间呈周期性变化的介电结构,按介电常数在空间的分布可分为一维、二维以及三维等类型,图10是典型光子晶体的三种周期性空间结构(实际光子晶体具有更多样的周期、准周期结构)^[104]。

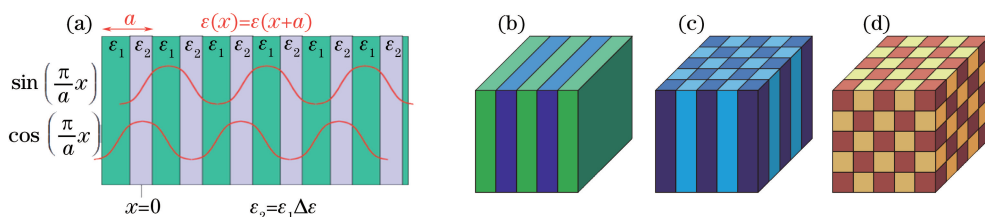


图10 (a) 光子晶体中的介电常数分布; (b) 一维、(c) 二维和(d) 三维结构示意图

Fig. 10 (a) Dielectric constant distribution of photonic crystals; (b) one-dimensional, (c) two-dimensional, and (d) three-dimensional photonic crystals

光子晶体不仅具有光谱选择性,而且具有一定的角谱选择性,可用于非聚焦型空间低通滤波器。对比图10和图1、3、8可以看出,体光栅、多层介质薄膜和Rugate薄膜与一维光子晶体结构类似。

按构成材料是否包含超常介质,光子晶体可分为普通介质光子晶体滤波器和超常介质光子晶体空间低通滤波器。普通介质光子晶体的滤波原理和体光栅、薄膜类似,而超常介质光子晶体的滤波原理则较为复杂,主要有自准直特性滤波、全反射原理滤波等^[46,105-107]。图11给出了基于自准直原理的滤波示意图^[46]。

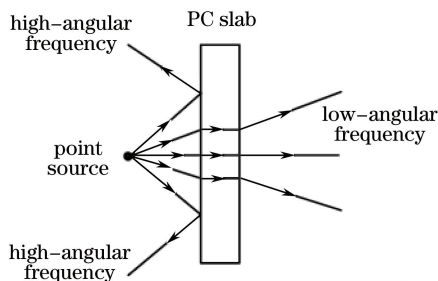


图11 基于自准直原理的光子晶体空间低滤波示意图

Fig. 11 Schematic of low-pass spatial filtering based on self-collimating principle of the photonic crystal

从图11可以看出,只有空间低频成分能够满足该光子晶体的自准直条件,高效率透射出该光子晶体,而高频成分不满足,均被高效率反射。因此通过非线性光子晶体的自准直效应可实现低频成分和高频成分的空间分离,从而实现非聚焦型光束空间低滤波。

5.2 研究进展

对光子晶体的研究主要围绕其光子带隙结构展开,研究重点是其光谱特性,而对其角谱特性的研究相对

较少。1999年, Kosaka等^[108]发现光子晶体的自准直现象, 该技术可用于光束空间滤波。2005年, Moreno等^[40]提出了利用多层介质模(一维光子晶体)来实现光束的空间低通滤波。2006年, Martínez等^[109]提出负折射率材料的超常介质光子晶体具有一定的角谱选择性, 可用来改善光束质量。2009年, Andriy等^[110]提出了利用二维电介质光子晶体来实现角谱高通或带通的滤波器, 带宽达到 20° , 且通带和阻带的过渡带非常陡峭。2014年, 该团队提出基于二维正方形格子的光子晶体空间滤波器, 这种滤波器类似于闪耀光栅, 可在一定的光谱范围和较广的角谱范围内完成高效率衍射, 从而实现空间高通或带通效果^[111]。

同济大学许静平等^[107]提出利用含负折射率材料的光子晶体的共振隧穿效应, 可实现光束空间滤波, 该光子晶体的结构是正负折射率材料呈周期性交替分布。仿真结果表明, 该结构具有光谱和角谱选择特性, 角谱选择性带宽可达 0.599° 。2007年, 中科院上海微系统和信息技术研究所与斯坦福大学、麻省理工学院联合发表利用非线性光子晶体的克尔效应与自准直效应的相互作用, 可在一定范围内控制光束发散角的论文^[112]。湖南大学 Tang等^[46]提出利用具有自准直效应的二维正方形格子光子晶体来实现光束空间低通滤波的技术, 在入射角大于某一特定角度时, 光束被高效率反射, 而当入射角小于这一特定角度时, 光束高效率透射, 从而实现了光束的低通滤波。2008年, 湖南大学项元江等^[105]提出利用不确定介质或低有效折射率光子晶体均可实现高性能的空间低通滤波, 给出最小的滤波角谱带宽为 20° 。2010年, 罗朝明等^[113]提出了含负折射率材料带缺陷层的一维光子晶体, 通过对缺陷层参数的优化设计, 得到了偏振无关非全向缺陷膜, 利用这一特性, 设计了低通、高通、带通空间滤波器, 滤波带宽最小为 11° 。

综上所述, 光子晶体空间低通滤波器尽管在理论研究方面取得了一定成果, 但由于制作工艺等限制, 理论结果的实验验证主要利用微波波段来间接证明, 实际应用在光波波段还存在一定的困难, 对于更窄的角谱选择性带宽, 如毫弧度或亚毫弧度量级, 还没有给出具体的实现方案, 同时由于没有分析抗光损伤能力, 因此在高功率非聚焦型空间低通滤波领域, 超常介质的光子晶体空间滤波技术还需要进一步深入研究。

6 结束语

通过对体光栅的布拉格衍射特性、多层介质薄膜和 Rugate 薄膜的相长相消干涉特性, 以及光子晶体的自准直特性的简单分析可以得出, 这 4 种技术无需对光束聚焦, 即可实现光束低频成分和高频成分的空间分离效果, 达到非聚焦即可实现激光光束空间低通滤波的目的。就原理而言, 这 4 种技术具有取代针孔滤波的可能性, 然而受限于当前的技术条件和制备工艺, 它们和针孔滤波相比互有优势。尽管高抗光损伤阈值的体光栅记录介质-光热折变玻璃已大规模生产, 但其横向尺寸还达不到分米量级, 因此难以用于大口径光束的使用; 多层介质薄膜尽管横向尺寸可以达到米量级, 但由于其高低折射率分层处的内应力较大, 在更高功率激光的使用中存在被破坏的可能性; Rugate 薄膜由于折射率连续变化, 没有各膜层之间的内应力, 因此较多层介质薄膜具有更高的抗光损伤阈值, 然而其具体制备, 尤其是横向尺寸达到米量级的制备还存在困难; 光子晶体的横向尺寸以及角谱选择特性能否满足大口径光束的使用都是需要进一步分析的问题。而对于超短脉冲激光光束的应用, 由于这 4 种技术均具有光谱选择性, 因此如何在确保一定光谱选择性的前提下, 不破坏脉冲激光的时域波形, 且保证有较好的角谱选择性是应用设计的难点。

分别综述了基于体光栅、多层介质薄膜、Rugate 薄膜和光子晶体这四种技术的光束空间低通滤波原理及其研究进展。通过对比分析, 得出这四种技术手段能应用于光束近场滤波的主要原因是它们所具有的波矢选择性, 事实上, 只要是具有波矢选择特性的光学器件, 都可研究其作为光束近场滤波的可行性。这四种技术多被用于光谱滤波和光谱整形等领域, 即在一定角度范围内的光谱选择性研究较多, 而在一定波长范围内的角谱选择性研究较少, 实际上在研究其光谱选择特性时, 已经考虑到了角谱选择特性的影响, 随着光学图像处理、光束近场空间滤波等研究的兴起, 它们的角谱选择性理论及其应用研究将会得到进一步拓展。

参 考 文 献

- 1 M L Ngan, K C Lee, K W Cheah. High power density laser etching of silicon[J]. J Appl Phys, 1998, 83(3): 1637-1641.
- 2 Song Weilian. The development of laser processing technology[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(B09): 755-758

- 宋威廉. 激光加工技术的发展[J]. 激光与红外, 2006, 36(B09): 755-758.
- 3 Hu Changkui, Chen Peifeng, Huang Tao. Switching focusing and integrating of light beam in high power laser process [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(2): 53-56.
胡昌奎, 陈培锋, 黄涛. 高功率激光加工中光束的转换、聚焦和整合[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(2): 53-56.
- 4 John T Hunt. National Ignition Facility performance review 1999[R]. Livermore: University of California, 2000.
- 5 C A Haynam, P J Wegner, J M Auerbach, *et al.*. National Ignition Facility laser performance status[J]. Appl Opt, 2007, 46(16): 3276-3303.
- 6 John Caird, Vivek Agrawal, Andy Bayramian, *et al.*. Nd:glass laser design for laser ICF fission energy (LIFE)[J]. Fusion Sci Technol, 2009, 56(2): 607-617.
- 7 S C Burkhart, E Bliss, P Di Nicola, *et al.*. National Ignition Facility system alignment[J]. Appl Opt, 2011, 50(8): 1136-1157.
- 8 Lou Qihong, Zhou Jun, Wang Zhijiang. Analysis of high-power fiber laser weapons[J]. Laser Technology, 2003, 27(3): 161-165.
楼祺洪, 周军, 王之江. 光纤激光作为激光武器的能力分析[J]. 激光技术, 2003, 27(3): 161-165.
- 9 Wang Xuejun. Developments and trends of US naval shipborne laser weapons[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(12): 27-37.
王学军. 美国海军舰载激光武器研发进展与趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(12): 27-37.
- 10 Xiao Kaibo, Yuan Xiaodong, Jiang Xinying, *et al.*. Research status of conceptual design of diode-pumped solid-state laser driver for LIFE[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 040001.
肖凯博, 袁晓东, 蒋新颖, 等. 美国 LIFE 计划激光驱动器概念设计研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 040001.
- 11 J T Hunt, P A Renard, W W Simmons. Improved performance of fusion lasers using the imaging properties of multiple spatial filters[J]. Appl Opt, 1977, 16(4): 779-782.
- 12 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.
- 13 Daizhong Liu, Fengnian Lu, Jinzhou Cao, *et al.*. Design and application of a laser beam alignment system based on the imaging properties of a multi-pass amplifier[J]. Chin Opt Lett, 2006, 4(10): 601-604.
- 14 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.
- 15 Bonghoon Kang, Gi Tae Joo, Bum Ku Rhee. Optimization of the input fundamental beam by using a spatial filter consisting of two apertures[J]. J Korean Phys Soc, 2010, 56(1): 325-328.
- 16 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.
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.
- 17 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, 蒋东斌, 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.
- 18 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.
- 19 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.
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.
- 20 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(11): 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(11):

- 111402.
- 21 Liu Hongjie, Jing Feng, Li Qiang, *et al.*. To measure the three dimensional distributing of a narrow object with white light interferometer[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.
- 22 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.
- 23 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]. J Opt, 2010, 12(9): 095704.
- 24 P M Celliers, K G Estabrook, R J Wallace, *et al.*. Spatial filter pinhole for high-energy pulsed lasers[J]. Appl Opt, 1998, 37(12): 2371-2378.
- 25 J E Murray, D Milam, C D Boley, *et al.*. Spatial filter pinhole development for the National Ignition Facility[J]. Appl Opt, 2000, 39(9): 1405-1419.
- 26 A Bayramian, S Aceves, T Anklam, *et al.*. Compact, efficient laser systems required for laser inertial fusion energy[J]. Fusion Sci Technol, 2011, 60(1): 28-48.
- 27 Zhang Xin, Zhou Wei, Hu Dongxia, *et al.*. Application of cone pinhole in high energy solid-state laser beam[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(7): 1700-1704.
张鑫, 周维, 胡东霞, 等. 高功率固体激光器锥形空间滤波孔应用[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(7): 1700-1704.
- 28 J E Ludman, J R Riccobono, N O Reinhand, *et al.*. Very thick holographic nonspatial filtering of laser beams[J]. Opt Eng, 1997, 36(6): 1700-1705.
- 29 Michele Henrion, Jacques Ludman, Gennadi Sobolev, *et al.*. Two-dimensional holographic nonspatial filtering for laser beams[C]. SPIE, 1998, 3417: 195-206.
- 30 Zheng Guangwei, He Yanlan, Huang Shuihua, *et al.*. Low-pass spatial filtering for continuous-wave laser beam by transmission volume phase gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 863-868.
郑光威, 何焰蓝, 黄水花, 等. 透射型体相位光栅对连续激光束的空间低通滤波[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 863-868.
- 31 Zheng Haobin, He Yanlan, Tan Jichun, *et al.*. Fabrication of volume Bragg gratings for spatial filtering[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(1): 125-130.
郑浩斌, 何焰蓝, 谭吉春, 等. 用于实现空间低通滤波的体布拉格光栅的制备[J]. 光电工程, 2009, 36(1): 125-130.
- 32 Yanlan He, Haobin Zheng, Jichun Tan, *et al.*. Two-dimensional non-spatial filtering based on holographic Bragg gratings[J]. Chinese Physics B, 2010, 19(7): 074215.
- 33 Zheng Guangwei, Tan Jichun, He Yanlan, *et al.*. Low-pass spatial filtering for continuous-wave laser beam by reflection volume phase gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1554-1559.
郑光威, 谭吉春, 何焰蓝, 等. 反射型体相位光栅对连续激光束空间低通滤波[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1554-1559.
- 34 Guangwei Zheng, Benjian Shen, Jichun Tan, *et al.*. Experimental research on spatial filtering of deformed laser beam by transmitting volume Bragg grating[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(3): 030501.
- 35 Zhang Xiang. Research on the angular selectively filtering and laser beam control by volume Bragg grating[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
张翔. 基于体布拉格光栅的角选择滤波与光束控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- 36 Xiang Zhang, Xiao Yuan, Shang Wu, *et al.*. Two-dimensional angular filtering by volume Bragg gratings in photothermorefractive glass[J]. Opt Lett, 2011, 36(11): 2167-2169.
- 37 Xiang Zhang, Xiao Yuan, Jiansheng Feng, *et al.*. Optimization of spatial filter with volume Bragg gratings in photothermo-refractive glass[J]. Opt Lett, 2014, 30(3): 663-665.
- 38 Xiang Zhang, Fan Gao, Jiansheng Feng, *et al.*. Near field angular filtering with volume Bragg gratings in photothermorefractive glass[C]. SPIE, 2014, 8962: 89620L.
- 39 Shang Wu, Xiao Yuan, Xiang Zhang, *et al.*. Broadband angular filtering with a volume Bragg grating and a surface grating pair[J]. Opt Lett, 2014, 39(14): 4068-4071.
- 40 Ivan Moreno, J Jesus Araiza, Maximino Avendano-Alejo. Thin-film spatial filters[J]. Opt Lett, 2005, 30(8): 914-916.

- 41 Ying Zhang, Hongji Qi, Kui Yi, *et al.*. An improved transmitting multi-layer thin-film filter[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(5): 054212.
- 42 Zhang Ying, Wang Yanzhi, Qi Hongji, *et al.*. Analysis on spatial filtering by reflecting combination device[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0616002.
章 瑛, 王胭脂, 齐红基, 等. 反射型组合器件的空间滤波分析[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0616002.
- 43 Ying Zhang, Hongji Qi, Kui Yi, *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.
- 44 Luo Zhaoming, Wen Shuangchun, Tang Zhixiang, *et al.*. Low-pass rugate spatial filters for beam smoothing[J]. Opt Commun, 2010, 283(13): 2665-2668.
- 45 Zhang Ying, Yi Kui, Qi Hongji, *et al.*. Design of phase-shifted Rugate thin film spatial filter[J]. Chinese J Lasers, 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.
- 46 Zhixiang Tang, Dianyuan Fan, Shuangchun Wen, *et al.*. Low-pass spatial filtering using a two-dimensional self-collimating photonic crystal[J]. Chin Opt Lett, 2007, 5(s1): 211-213.
- 47 Andriy E Serebryannikov, Philippe Lalanne, Alexander Yu Petrov, *et al.*. Wide-angle reflection-mode spatial filtering and splitting with photonic crystal gratings and single-layer rod gratings[J]. Opt Lett, 2014, 39(21): 6193-6196.
- 48 Li Biao, Chen Huaixin, Sui Zhan, *et al.*. Spatial filtering in near field based on rotating and polarizing property of crystal [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(1): 41-44.
李 彪, 陈怀新, 隋 展, 等. 基于晶体旋光效应的近场光学空间滤波[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(1): 41-44.
- 49 Hung Te Hsieh. Operation of holographic elements with broadband light sources[D]. California: California Institute of Technology, 2005.
- 50 George B Venus, Armen Sevan, Vadim I Smirnov. Stable coherent coupling of laser diodes by a volume Bragg grating in photothermorefractive glass[J]. Opt Lett, 2006, 31(10): 1453-1455.
- 51 Yushi Kaneda, Li Fan, Ta Chen Hsu, *et al.*. High brightness spectral beam combination of high-power vertical-external-cavity surface-emitting lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(17): 1795-1797.
- 52 Alexei L Glebov, Akio Sugama, Vadim I Smirnov, *et al.*. Angle selective enhancement of beam deflection in high-speed electrooptic switches[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(9): 701-703.
- 53 Kent B Hill, David Brady. Pulse shaping in volume reflection holograms[J]. Opt Lett, 1993, 18(20): 1739-1741.
- 54 Y Ding, D D Nolte. Bandwidth study of volume holography in photorefractive InP:Fe for femtosecond pulse readout at 1.5 μm [J]. J Opt Soc Am B, 1998, 15(11): 2763-2768.
- 55 Shun Der Wu, Thomas K Gaylord, Eilas N, Glytsis, *et al.*. Angular sensitivities of volume gratings for substrate-mode optical interconnects[J]. Appl Opt, 2005, 44(21): 4447-4453.
- 56 Pär Jelger, Fredrik Laurell. Efficient narrow-linewidth volume-Bragg grating-locked Nd: fiber laser [J]. Opt Express, 2007, 15(18): 11336-11340.
- 57 J Lumeau, L B Glebov. Tunable narrowband filter based on a combination of Fabry-Perot etalon and volume Bragg grating[J]. Opt Lett, 2006, 31(16): 2417-2419.
- 58 Leonid B Glebov. High brightness laser design based on volume Bragg gratings[C]. SPIE, 2006, 6216: 621601.
- 59 Kai Hsiu Liao, Ming Yuan Cheng, Emilie Flecher, *et al.*. Large-aperture chirped volume Bragg grating based fiber CPA system[J]. Opt Express, 2007, 15(8): 4876-4882.
- 60 Frank Havermeier, Wenhai Liu, Christophe Moser. Volume holographic grating-based continuously tunable optical filter [J]. Opt Eng, 2004, 43(9): 2017-2021.
- 61 A Gourevitch, G Venus, V Smirnov, *et al.*. Efficient pumping of Rb vapor by high-power volume Bragg diode laser[J]. Opt Lett, 2007, 32(17): 2611-2613.
- 62 George Venus, Leonid Glebov, Vasile Rotar, *et al.*. Volume Bragg semiconductor lasers with near diffraction limited divergence[C]. SPIE, 2006, 6216: 621602.
- 63 Michaël Hemmer, Yann Joly, Leonid Glebov, *et al.*. Volume Bragg grating assisted broadband tenability and spectral narrowing of Ti:sapphire oscillators[J]. Opt Express, 2009, 17(10): 8212-8219.
- 64 C C Tsai, B Ya Zeldovich, L B Glebov, *et al.*. Cross-gratings volume hologram: Backward reflection with high angular

- and spectral selectivity[J]. *Opt Express*, 2006, 14(21): 9558-9563.
- 65 Xiang Zhang, Gan Gao, Jiansheng Feng, *et al.*. Wavelength combining with volume Bragg gratings in photo-thermo-refractive glasses[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(3): 030901.
- 66 D Peri, A A Friesem. Image restoration using volume diffraction gratings[J]. *Opt Lett*, 1978, 3(4): 124-126.
- 67 D Peri, A A Friesem. Volume holograms for image restoration[J]. *J Opt Soc Am*, 1980, 70(5): 515-522.
- 68 D Peri, D Ritter. Spatial filtering with volume grating[J]. *Appl Opt*, 1985, 24(10): 1535-1540.
- 69 Yu L Korzinin, I V semenova, N O Reinhand, *et al.*. Holographic nonspatial filter for laser beams: 2D selection[C]. *SPIE*, 1996, 2778: 35-36.
- 70 Jacques E Ludman, Juanita R Riccobono, N O, Reinhand *et al.*. Very thick holographic nonspatial filtering of laser beams[J]. *Opt Eng*, 1997, 36(6): 1700-1705.
- 71 Jacques E Ludman, Timothy D Upton. Single-element holographic nonspatial filter[C]. *SPIE*, 2003, 5005: 375-379.
- 72 Zhang Guangyong, Zhang Heling. Holographic filter with spatial filtering action [J]. *Journal of Capital Normal University*, 1997, 18(3): 41-44.
张光勇, 章鹤龄. 具有空间滤波性能的全息滤波器[J]. *首都师范大学学报*, 1997, 18(3): 41-44.
- 73 Fu Ensheng. Refinement of a laser beam quality using in-cavity Bragg grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, 40(12): 24-26.
傅恩生. 用腔内布拉格光栅改善激光源的空间光束质量[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, 40(12): 24-26.
- 74 Leonid Glebov. Fluorinated silicate glass for conventional and holographic optical elements [C]. *SPIE*, 2007, 6545: 654507.
- 75 Xiang Zhang, Jiansheng Feng, Baoxing Xiong, *et al.*. Diffraction of volume Bragg gratings under high flux laser irradiation[J]. *Opt Express*, 2014, 22(7): 8291-8297.
- 76 Zheng Guangwei. Research on the non-focusing low-pass spatial filter for high power laser beam [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
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.
- 77 Lawrence Domash, Ming Wu, Nikolay Nemchuk, *et al.*. Tunable and switchable multiple-cavity thin film filters[J]. *J Lightwave Technol*, 2004, 22(1): 126-135.
- 78 N K Sahoo. New generation optical nanometric multilayer interference coatings: The emerging dimensions [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1313: 65-69.
- 79 L Quarrie. Theoretical simulations of protective thin film Fabry-Perot filters for integrated optical elements of diode pumped alkali lasers (DPAL) [C]. *AIP Advances*, 2014, 4: 097107.
- 80 Ivan Moreno, J Jesus Araiza. Thin-film optical filters for spatial frequencies [C]. *SPIE*, 2004, 5524: 409-416.
- 81 Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang, *et al.*. Characteristics and improvement of dense wavelength division multiplexing (DWDM) thin film filters used in tilted incidence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(3): 377-380.
顾培夫, 李海峰, 章岳光, 等. 用于倾斜入射的波分复用薄膜滤光片的特性及改进[J]. *光学学报*, 2003, 23(3): 377-380.
- 82 Cao Changsheng, Luo Bin, Pan Wei, *et al.*. A linear tuning filter based on thin-film interference filters[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(8): 1055-1058.
曹昌胜, 罗斌, 潘炜, 等. 基于薄膜干涉滤光片的线性调谐滤光器[J]. *中国激光*, 2005, 32(8): 1055-1058.
- 83 Li Ming, Zhang Bin, Dai Yaping, *et al.*. Multilayer dielectric thin film reflector for spectrum reshaping of chirped pulse laser in Nd:glass chirped pulse amplification system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(8): 4898-4903.
李铭, 张彬, 戴亚平, 等. 用于钕玻璃啁啾脉冲放大系统光谱整形的多层介质膜反射镜[J]. *物理学报*, 2008, 57(8): 4898-4903.
- 84 Yu Kan, Huang Dexiu, Bao Jiaqi, *et al.*. Research on the beam propagation characteristics in narrowband filter based on frequency domain recursive algorithm[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2013, 24(3): 459-463.
余侃, 黄德修, 包佳琪, 等. 基于频域递推算法的窄带滤光片光束传输特性研究[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(3): 459-463.
- 85 Liang Guanquan, Han Peng, Wang Hezhou. Thin-film optical filters with both functions of incident angle and frequency [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(7): 2197-2200.

- 梁冠全, 韩鹏, 汪河洲. 空间与频率双性能的薄膜光学滤波器[J]. 物理学报, 2004, 53(7): 2197-2200.
- 86 Shaoji Jiang, Jianrong Li, Jijia Tang, *et al.*. Multi-channel and sharp angular spatial filters based on one-dimensional photonic crystals[J]. Chin Opt Lett, 2006, 4(10): 605-607.
- 87 Li Jianrong. Properties of multi-frequency filtering and sharp angular filtering in thin-film optics[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2007: 59-80.
- 李建荣. 光学薄膜多频滤波与空间滤波特性研究[D]. 广州: 中山大学, 2007: 59-80.
- 88 Gu Peifu, Bai Shengyuan, Li Haifeng. Design of DWDM thin-film interference filters[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(7): 794-797.
- 顾培夫, 白胜元, 李海峰. 密集型波分复用薄膜干涉滤光片的设计[J]. 光学学报, 2002, 22(7): 794-797.
- 89 Xuezheng Sun, Peifu Gu, Mingyu Li, *et al.*. Tunable spatial demultiplexer based on the Fabry-Perot filter[J]. Opt Express, 2006, 14(18): 8470-8475.
- 90 W H Southwell, Randolph L Hall. Rugate filter sidelobe suppression using quintic and rugated quintic matching layers[J]. Appl Opt, 1989, 28(14): 2949-2951.
- 91 W H Southwell. Spectral response calculations of rugate filters using coupled-wave theory[J]. Appl Opt, 1988, 28(14): 2949-2951.
- 92 W H Southwell. Using apodization functions to reduce sidelobes in rugate filters[J]. Appl Opt, 1989, 28(23): 5091-5094.
- 93 Andy C van Popta, Matthew M Hawkeye, Jeremy C Sit, *et al.*. Gradient-index narrow-bandpass filter fabricated with glancing-angle deposition[J]. Opt Lett, 2004, 29(21): 2545-2547.
- 94 Zhao Lei, Sui Zhan, Zhu Qihua, *et al.*. Design of Rugate filter for gain narrowing compensation[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(6): 3977-3982.
- 赵磊, 隋展, 朱启华, 等. 用于补偿增益窄化效应的 Rugate 滤波器设计[J]. 物理学报, 2009, 58(6): 3977-3982.
- 95 Bertrand G Bovard. Rugate filter theory: An overview[J]. Appl Opt, 1993, 32(28): 5427-5442.
- 96 Bertrand G Bovard. Rugate filter design: The modified Fourier transform technique[J]. Appl Opt, 1990, 29(1): 24-30.
- 97 William J Gunning, Randolph L Hall, Frank J Woodberry, *et al.*. Codeposition of continuous composition rugate filter[J]. Appl Opt, 1989, 28(14): 2945-2948.
- 98 Kevin Robbie, Gisia Beydaghyan, Tim Brown, *et al.*. Ultrahigh vacuum glancing angle deposition system for thin films with controlled three-dimensional nanoscale structure[J]. Rev Sci Instr, 2004, 75(4): 1089-1097.
- 99 R Leitel, O Stenzel, S Wilbrandt, *et al.*. Fabrication and characterization of rugate structures composed of SiO₂ and Nb₂O₅[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(4): 505-511.
- 100 Adam John Nolte. Fundamental studies of polyelectrolyte multilayer films: Optical, mechanical, and lithographic property control[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2007: 37-44.
- 101 Stephan Fahr, Carolin Ulbrich, Thomas Kirchartz, *et al.*. Rugate filter for light-trapping in solar cells[J]. Opt Express, 2008, 16(13): 9332-9343.
- 102 P V Usik, A E Serebryannikov, Ekmel Ozbay. Spatial and spatial-frequency filtering using one-dimensional graded-index lattices with defects[J]. Opt Commun, 2009, 282(23): 4490-4496.
- 103 Julien Lumeau, Vadim Smirnov, Leonid B Glebov. Phase-shifted volume Bragg gratings in photo-thermo-refractive glass[C]. SPIE, 2008, 6890: 68900A.
- 104 John D Joannopoulos, Steven G Johnson, Joshua N Winn, *et al.*. Photonic crystals: Molding the flow of light[M]. Princeton: Princeton University Press, 2008: 4.
- 105 Xiang Yuanjiang, Tang Zhixiang, Wen Shuangchun, *et al.*. Artificial media based low-pass spatial filters[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(s1): 85-89.
- 项元江, 唐志祥, 文双春, 等. 基于人工介质的低通空间滤波器[J]. 中国激光, 2008, 35(s1): 85-89.
- 106 Cao Shiming. Research on photonic crystal low-pass spatial filter[D]. Changsha: Hunan University, 2010: 25.
- 曹始明. 基于光子晶体的低通空间滤波器研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010: 25.
- 107 Xu Jingping, Wang Ligang, Yang Yaping. Realization of an angular filter using one-dimensional photonic crystal containing negative refractive metamaterials[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(6): 2765-2770.
- 许静平, 王立刚, 羊亚平. 利用含负折射率材料的光子晶体实现角度滤波器[J]. 物理学报, 2006, 55(6): 2765-2770.

- 108 Hideo Kosaka, Takayuki Kawashima, Akihisa Tomita, *et al.*. Self-collimating phenomena in photonic crystals[J]. Appl Phys Lett, 1999, 74(9): 1212-1214.
- 109 Alejandro Martínez, Miguel A Piqueras, Javier Martí. Generation of highly directional beam by k-space filtering using a metamaterial flat slab with a small negative index of refraction[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(13): 131111.
- 110 Andriy E Serebryannikov, A Y Petrov, Ekmel Ozbay. Toward photonic crystal based spatial filters with wide angle ranges of total transmission[J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(18): 181101.
- 111 Andriy E Serebryannikov, Philippe Lalanne, Alexander Yu Petrov, *et al.*. Wide-angle reflection mode spatial filtering and splitting with photonic crystal gratings and single-layer rod gratings[J]. Opt Lett, 2014, 39(21): 6193-6196.
- 112 Xunya Jiang, Chuanhong Zhou, Xiaofang Yu, *et al.*. The nonlinear effect from the interplay between the nonlinearity and the supercollimation of photonic crystal[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(3): 031105.
- 113 Luo Zhaoming, Tang Zhixiang, Cao Shiming, *et al.*. Polarization-independent and non-omnidirectional defect modes of one-dimensional photonic crystals with negative-index materials[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(8): 1723-1726.
- 罗朝明, 唐志祥, 曹始明, 等. 含负折射率材料 1 维光子晶体的偏振无关非全向的缺陷膜[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(8): 1723-1726.