

多端口波长选择开关的光学设计与优化

张倩¹, 陈根祥^{1*}, 宋菲君¹, 高云舒²

¹中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081;

²北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044

摘要 波长选择开关(WSS)是目前及下一代可重构光分插复用器(ROADM)与动态全光网络的核心器件。WSS 目前正向着多端口数与高光谱调制精细度的方向不断发展。利用光学设计软件 ZEMAX 模拟了整个 WSS 光学系统,通过建立傅里叶透镜组和双胶合柱面镜模型来改进 WSS 光学结构。利用评价函数、点列图及光学传递函数等评价手段对所设计的 WSS 光学系统进行评价与优化,并逐步改善整个 WSS 光学系统的成像情况。最终,得到了最小光谱滤波带宽在 8 GHz 范围内的 65 个端口的 WSS 光学系统。

关键词 光学设计; 波长选择开关; 液晶空间光调制器; ZEMAX

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.142201

Optical Design and Optimization of Multiport Wavelength Selective Switch

Zhang Qian¹, Chen Genxiang^{1*}, Song Feijun¹, Gao Yunshu²

¹ College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing, 100081, China;

² School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China;

Abstract A wavelength selective switch (WSS) is the core device of the current- and next-generation reconfigurable optical add-drop multiplexer and dynamic all-optical network, which is used to provide high port counts and spectral modulation fitness. In this study, we simulate a WSS system using the ZEMAX optical software. Further, a Fourier lens group and double cylinder lens are employed to improve the optical structure of WSS. The WSS optical structure is designed and optimized by using a merit function, a spot diagram, and an optical transfer function. Subsequently, the imaging capability of the entire WSS optical system is gradually improved. Finally, a 65-port WSS optical system with a minimum spectral filtering bandwidth of 8 GHz is obtained.

Key words optical design; wavelength selective switch; liquid crystal spatial light modulator; ZEMAX

OCIS codes 220.3620; 230.3720; 230.6120

1 引言

随着光通信技术的快速发展,可重构光分插复用器(ROADM)在下一代全光网络中发挥着至关重要的作用。波长选择开关(WSS),作为 ROADMs 的关键器件,不仅能够实现上下话波长灵活重构^[1-2],而且能够平衡各个波长通道功率并实现通道内波长的动态切换。液晶空间光调制器(LCoS-SLM)具有更窄的滤波带宽和更灵活的波长操控性能。经过近

几年的不断发展,LCoS-SLM 技术逐渐成为 WSS 的主流技术,也是未来全光网络发展的主要解决方案^[3]。Oclaro 公司于 2012 年 3 月推出了号称当时最多端口数的 1×23 端口 WSS 系统。2016 年 Finisar 公司研制的 4×16 端口的任意波形发生器(Waveshaper)成为目前商用性能最好的 WSS。该设备支持光强度和相位波形过滤及调整,最小损耗可达 4.5 dB,最小带宽可以达到 10 GHz,波长操控分辨率为 1 GHz。2017 年武汉邮电科学研究院研

收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2018-12-25; 录用日期: 2019-02-17

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(61627814)、国家自然科学基金(61275052)

* E-mail: gxchen_bjtu@163.com

制出了 1×9 端口的 WSS 样机, 整体损耗达为 5.5 dB~6.0 dB, 能够实现 15 GHz~5 THz 的滤波带宽, 波长操控分辨率可达 6.25 GHz, 性能指标良好^[4]。

目前 WSS 的主要发展趋势是通过增加端口数来提高上下话路通道的可扩展性, 通过减小最小滤波带宽来提高频谱利用率。但是, 由于液晶空间光调制器^[5-9]受最大偏转角度的限制, 在有限的光束偏转距离内增加端口数的唯一途径是缩小单个端口的尺寸。目前, 主流 WSS 端口尺寸最小可达到 250 μm 。此外, WSS 系统中液晶空间光调制器^[8]使用的柱面镜对光束的聚焦能力影响着最小滤波带宽, 聚焦的光束越窄越有利于减小最小滤波带宽^[10]。目前已报道的 WSS 最小滤波带宽可达到 10 GHz。

本文主要通过 ZEMAX 光学软件优化了波长选择开关光学系统, 利用 $2f$ 光学系统设计了一组傅里叶组合透镜组, 实现端口尺寸为 127 μm 的多端口数 WSS。在此基础上, 针对进一步提升该 WSS 系统光谱分辨率的问题, 通过优化柱面组合透镜使液晶空间光调制器上的光斑压窄到了 32 μm 的范围内, 使整个 C 波段的最小滤波带宽可以保持在 8 GHz 范围内。

2 波长选择开关的光学设计

2.1 光路设计与参数确定

初始结构的选择影响着—个光学系统的成像质量^[11]。如果光学系统的初始结构选择不合理, 即使拥有丰富的光学设计经验的人也很难使最终的光学系统达到理想的成像效果。因此, 初始结构的选取将直接影响最终光学系统的成像效果。图 1 为经典的基于液晶 (LCoS) 的 WSS 系统结构^[4,10], 包括—维光纤耦合微透镜阵列、双胶合透镜、透射体光栅、柱面镜和 LCoS, 共 5 个部分。输入光束通过光纤耦合微透镜阵列中心的公共端口进入体光学部分。光束经过双胶合透镜准直并入射到高密度透射光栅上, 光栅对各不同波长的通道进行色散展开, 并利用柱面镜将其会聚成像到液晶空间光调制器上, 在整个 LCoS 芯片有效像素区域形成矩形色散图谱。在 LCoS 芯片的不同波长通道所对应的像素区域上加载不同周期的相位光栅全息图^[12-14], 完成对该波长通道衍射光束的方向调整。被反射的衍射光束通过双胶合透镜后成为对应于不同输出端口的准直平行光, 再经微透镜会聚至光纤阵列的不同输出端口输

出, 从而完成任意波长信号在输入输出端口间的低损耗光互连。利用以上结构搭建 C 波段高分辨率可调谐滤波器^[15], 如图 2 所示, 其最小滤波带宽可以达到约 10 GHz。这充分说明了该光学结构的合理性, 接下来进一步对其进行改进。

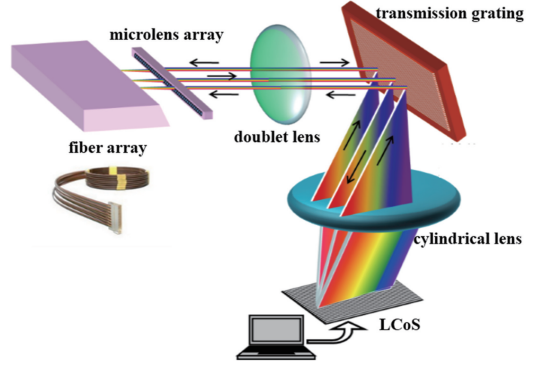


图 1 波长选择开关结构图

Fig. 1 Structural diagram of wavelength selective switch

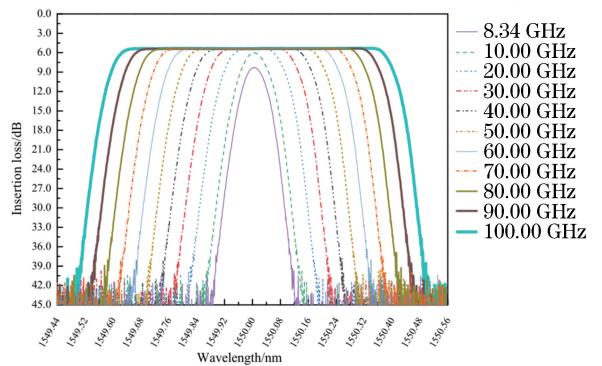


图 2 可调谐滤波器的不同滤波带宽

Fig. 2 Different filtering bandwidths of tunable filter

为了将透射光栅锥形衍射的影响降到最低, 使用 Ibsen 公司的 966 lp/mm 的透射型光栅。该光栅的缺点是色散角比较小, 所以必须使光栅与柱面镜之间有—足够的距离, 保证光束通过光栅后的色散光恰好可以覆盖全部液晶。因为 WSS 系统中液晶空间光调制器需要同时放置在柱面镜和双胶合透镜的后焦面上, 所以相应的双胶合透镜的后焦距需要根据柱面镜的焦距适当增加。若使用普通前后焦距相同的双胶合透镜会导致光束从光纤耦合微透镜出射后因传播距离过长而引起光斑超过液晶尺寸, 故本研究使用前后焦距不同的组合透镜系统来代替普通的单个双胶合透镜。同时, 为了提高 WSS 的最小滤波带宽, 柱面镜的光束会聚能力至关重要。因此, 利用优化的柱面系统替换系统中原有的柱面镜, 提高了其对光束的会聚能力。

该系统较为复杂,需要在 ZEMAX 软件的序列模式下从前到后依次进行设计。由于光纤的模场半径为 $5.2\ \mu\text{m}$,所以分别设置输入光的束腰半径为 $5.2\ \mu\text{m}$ 且中心波长分别为 $1530, 1545, 1560\ \text{nm}$ 三个波长的高斯光束。三束光通过微透镜阵列入射。在微透镜与透射光栅之间是单独设计的由两个双胶合透镜组成的焦距为 $225\ \text{mm}$ 的傅里叶透镜组^[16],如图 3 所示。设计傅里叶透镜组的目的是控制光束通过微透镜后的发散距离,使入射到透射光栅的光束保持为直径为 $6\ \text{mm}$ 的平行光,同时缩短微透镜到透射光栅之间的距离,减小整个系统的空间尺寸。

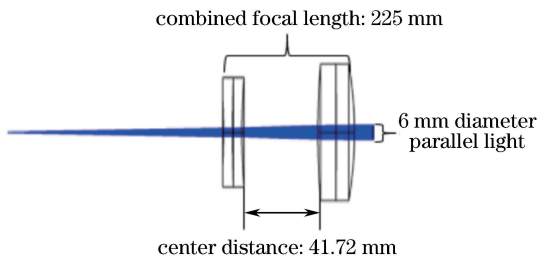


图 3 傅里叶透镜组结构

Fig. 3 Fourier lens group structure

光束经过透射光栅后,不同波长的光具有不同的衍射角度,这些具有不同衍射角度的光再经过一个初始焦距为 $500\ \text{mm}$ 组合柱面镜系统。柱面镜能使光束在一个方向上聚焦而另一个方向上不变。为了补偿柱面镜引起的像差,在柱面镜之后插入两片双胶合透镜。由于 LCoS 的功能仅仅是改变光束的传播方向,所以可用一个平面镜来代替 LCoS。在序列模式里还需将各光学器件按照光束入射到平面镜时的顺序反向摆好,以使光束通过平面镜反射后再返回,最终耦合至微透镜。通过设置平面镜的不同偏转角度来模拟 LCoS 的偏转,使光束返回至微透镜阵列的不同端口,从而实现将指定波长光束切换到 WSS 任意端口的目的。

先单独设计两套组合透镜系统,然后再整合到一起。微透镜与透射光栅之间的傅里叶透镜组的初始结构由两个双胶合平板透镜组成,其焦距、厚度、材料设为变量,然后在评价函数中设置各参数,使傅里叶透镜组的出射光为平行光并且光斑直径为 $6\ \text{mm}$ 。经过多次优化后的傅里叶透镜结构如图 3 所示。将图 3 系统中光学元件的参数作为固定值,其后依次添加其他光学器件:衍射光栅、组合柱面镜系统和反射镜。由于透射光栅入射角为 49.9° ,故在 ZEMAX 序列模式中需要在透射光栅前后分别添加坐标断点使光束产生偏折。坐标断点需要根据光栅

刻线数、光栅材料、入射波长设置相应的倾斜角度。建立好光学系统结构之后,首先需要编辑评价函数并调整目标值和权重,然后释放透射光栅前的傅里叶透镜组参数并反向顺序设置各光学器件。平面镜之后光学器件的各个参数应依据与自身相对应的前面光学器件的数据而定。通过进一步改善评价函数且多次优化,最终得到如图 4 所示的系统结构。

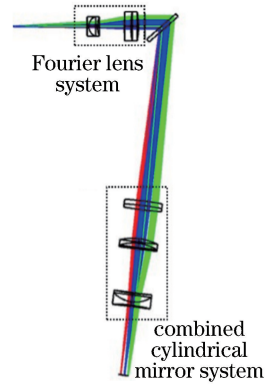


图 4 ZEMAX 总体系统框图

Fig. 4 ZEMAX overall system block diagram

2.2 评价函数设置

由于整个系统较为复杂,而 ZEMAX 自带的默认评价函数过于简单,故在 ZWMAX 光路设计中评价函数的设置显得尤为重要。MNCG、MXCG、MNEG、MXEG 操作符是对玻璃的中心和边界的约束条件,MNCA、MXCA 操作符是对空气的中心和边界约束条件,RANG 操作符是指光线相对于 z 轴的角度,以 $^\circ$ 表示。因光栅的色散作用,入射到液晶表面的不同波长的光会具有不同的入射角。在液晶表面使用 RANG 操作符可使入射到液晶表面的不同波长的光的入射角尽量小,从而减小系统的像差。SUMM、DIFF、PROD、DIVI 操作符分别表示对两行操作数作加、减、乘、除运算。由于系统对标准面上的光斑位置和尺寸均有严格的规定,有时数据非常小,这就需要把操作数乘以一个较大的数然后再配适当的权重才有意义。为了使两个操作数完全相等,这就需要作减法使得两个操作数之差为零。REAX、REAY 分别表示实际光线在指定编号表面上的 x, y 半径。在透射光栅表面、液晶表面和返回至微透镜上的光斑尺寸都要用到这两个操作符来设定光参数。图 5 为评价函数编辑器中的部分操作数。

设置评价函数并对其进展优化后,系统的评价函数值越小表示系统的整体性能越高。图 6 为设置后的初始优化操作图,评价函数值为 2.4416 。整个

Type	Commer				
1	CONE	1			
2	CONE	3			
3	MNCA	4	50.0000	0.0000	50.0000
4	MNCA	3	126.0000	1.0000	126.0000
5	MNCG	4	12.0000	1.0000	14.0322
6	MNCA	4	4.0000	10.0000	3.6110
7	MNCG	4	9.0000	5.0000	13.9200
8	MNCG	4	5.0000	10.0000	5.0000
9	MNCA	6	30.0000	1.0000	30.0000
10	MNCA	6	7.0000	5.0000	6.9111
11	MNCG	15	14.0000	5.0000	14.0000
12	MNCG	15	10.0000	2.0000	10.0000
13	MNCG	15	6.0000	10.0000	5.0988
14	MNCG	18	13.0000	5.0000	13.0000
15	MNCG	18	1.0000	5.0000	1.0000
16	MNCG	18	16.0000	8.0000	17.6138
17	MNCA	23	180.0000	5.0000	180.0000
18	MNCA	23	0.0000	5.0000	0.0000
19	TTHI	12	0.0000	0.0000	275.0000
20	OPGT	21	340.0000	1.0000	340.0000
21	OPGT	21	260.0000	1.0000	260.0000
22	OPGT	21	0.0000	0.0000	252.4669
23	OPGT	24	300.0000	1.0000	300.0000
24	OPGT	24	255.0000	1.0000	252.4669
25	TTHI	3	0.0000	0.0000	240.2888
26	TTHI	12	0.0000	0.0000	534.1288
27	OPGT	27	234.0000	1.0000	240.2888
28	OPGT	27	180.0000	1.0000	180.0000

图 5 评价函数编辑器

Fig. 5 Evaluation function editor

光学系统设置了 7 个组态,每个组态在光栅面、平面镜(即 LCoS)面以及像面等多个面上均对光斑尺寸有一定的要求。此外,评价函数中有些 Value 值太小,还需要进行 SUMM、DIFF、PROD、DIVI 等多种运算。因此,在整个系统中评价函数高达 3000 多行,即使每个评价函数的 %Contrib 取极小值,最后的系统评价函数值也无法降到最低。

初步的优化完成后,为了更大幅度地提升该光学系统的性能,还需要对其进行进一步的优化。锤形优化通过自动重复一个优化过程来脱离局部极值区的限制,可以对该光学系统进行更加细致的优化。不断调整评价函数的 Target 值和 Weig 值,进行多次优化,并经过长时间的锤形优化,最后将整个系统的评价函数值降至 1.0319。该值虽然还是偏大,但成像情况基本符合光学系统要求。

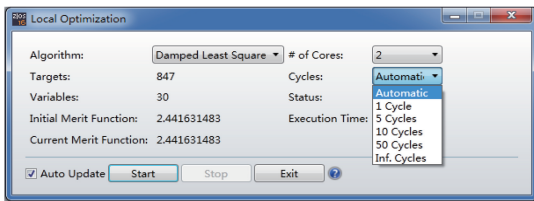


图 6 优化操作图

Fig. 6 Optimized operation diagram

3 设计结果分析与讨论

整个光学系统的设计及优化基本完成,接下来通过 ZEMAX 给出的图表分析来判断整个光学系统的成像情况。在实际成像过程中,由于色差、球差、像差等因素的存在,经入瞳的平行光线并不能严格地会聚在像面的某一点,而是形成一个弥散斑。理论上该弥散斑的半径越小,光学系统的成像效果越好。在 ZEMAX 中方均根(RMS)半径和几何(GEO)半径是对弥散斑大小的描述。RMS 半径是所有光线到达像面后的坐标的 RMS 值,能近似反映弥散斑的质量。几何半径则表示弥散斑的最大直径。

整个光学系统主要通过光线足迹图和点列图来进行分析。光线足迹图可以显示光斑在 x 和 y 方向上的最大位置。图 7 为平面镜(即 LCoS 面)上显示的光斑,其中图 7(a)为三个波长均存在时的情况,图 7(b)、(c)和(d)分别是波长为 1530, 1545, 1560 nm 时的单波长光线足迹图。可从图 7 读出数据并计算出光斑的尺寸,结果如表 1 所示。从表 1 看出,平面镜上各个波长的光斑在 x 方向上线宽接近 5.3 mm,在 y 方向上线宽最大为 32 μm 。假设使用 Holoeye 公司的型号为 GAEA 的液晶空间光调制器,单个像素尺寸为 3.74 μm ,分辨率为 3840 pixel \times 2160 pixel,通过计算,对应的最小滤波带宽能够保持在 1 GHz 至 8 GHz 的范围内^[10]。

图 8(a)为平面镜不偏转(即偏转角为 0°)时光束返回至微透镜(即像面)上的点列图。由图 8(a)可以看出,三个波长都形成较为圆滑且较为集中的光斑,读取数据最大半径为 8.5 μm ,RMS 半径为 5.887 μm 。通过多重组态的方法改变平面镜在 y 方向的倾斜角度,每隔 0.1°设置一个结构,从 0.1°至 0.7°共 7 个结构,点列图如图 8(b)所示。通过读取数据,结构 1~7 光斑的 RMS 半径分别为 13.763, 14.237, 15.808, 18.761, 23.214, 28.654, 34.490 μm 。因为微透镜的尺寸直径为 125 μm ,所以经过平面镜反射回去的光束可以耦合至微透镜中。在读取光线在 x 或 y 方向最大或小半径时发现,结构 1~7 的光斑中心并不在 x 轴上,结构 1 光线的 y 方向最大半径为 0.034 μm ,结构 7 光线的 y 方向最小半径为 -0.661 μm 。虽然整体偏向 x 轴下方,但仍然小于微透镜尺寸。结构 7 在像面上 x 方向的最小中心值为 -4.1438 mm。根据整个光学系统的对称性,可以认为当平面镜左右各偏转到 0.7°时,光斑在 x 方向上的距离为 8.2879 mm,即约为 65 个微透镜间距。由此可以得到整个波长选择开关可利用的端口数为 65。

4 结 论

在现有 WSS 结构的基础上设计了组合傅里叶透镜,并将 LCoS 前的单片柱面镜替换为双胶合柱面镜加球面镜的结构。该设计方案不但减小了光学系统像差,而且提高了光束在 LCoS 上的成像精度。利用 ZEMAX 光学软件对所设计的光学系统进行合理优化,得到 65 个端口的 WSS 光学系统结构,其最小滤波带宽在 8 GHz 范围内。本文为下一步的实验搭建提供了理论基础。

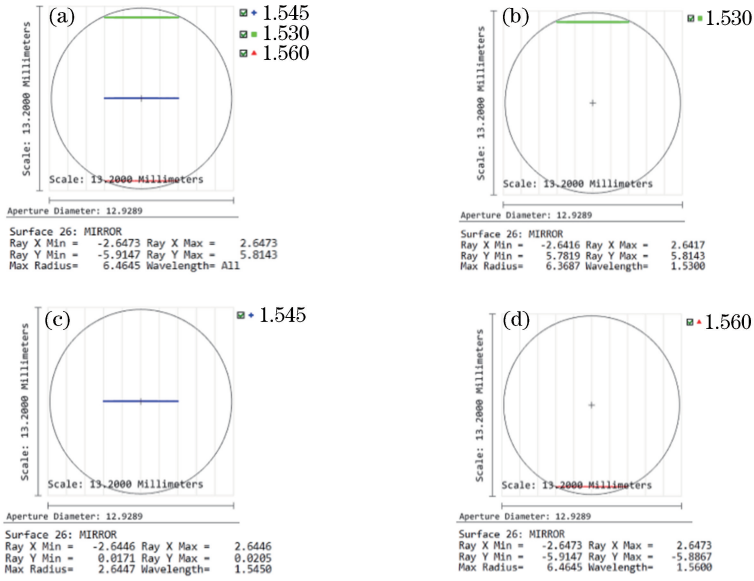


图 7 不同波长的光线足迹图。(a) 1530,1545,1560 nm 三个波长的光线足迹图;(b) 1530 nm 波长的光线足迹图;
(c) 1545 nm 波长的光线足迹图;(d) 1560 nm 波长的光线足迹图

Fig. 7 Light trails of different wavelengths. (a) Light trails at three wavelengths of 1530 nm, 1545 nm, and 1560 nm;
(b) light trail at 1530 nm; (c) light trail at 1545 nm; (d) light trail at 1560 nm

表 1 光线足迹图数据参数

Table 1 Data parameters of light trails

Wavelength /nm	Spot length in x axis /mm	Spot width in y axis /mm
1530	5.2834	0.0324
1545	5.2892	0.0034
1560	5.2946	0.0280

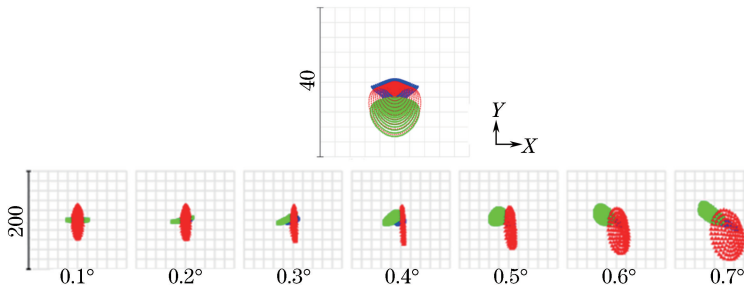


图 8 点列图。(a) 0°偏转角的点列图;(b) 6个组态的点列图

Fig. 8 Spot diagrams. (a) Spot diagram of 0° deflection angle; (b) spot diagram of 6-column

参 考 文 献

[1] Hao J, Cui Y Z. ROADM technology moves toward dynamic optical layer networking [J]. China New Telecommunications, 2018, 20(12): 48.
郝娟, 崔玉珍. ROADM 技术走向动态光层组网 [J]. 中国新通信, 2018, 20(12): 48.

[2] Xiong X F, Yang F, Gui Y Z, et al. Time-frequency transfer performance of wavelength selection switch in optical fiber communication network [J]. Chinese

Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0106003.
熊晓锋, 杨飞, 桂有珍, 等. 光纤通信网中波长选择开关的时频传递性能 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0106003.

[3] Li L, Liu G Q, Chen Y H. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123002.
黎磊, 刘桂强, 陈元浩. 光子晶体异质结构耦合波导光开关 [J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123002.

- [4] Chen R, Chen X, Chen Y, *et al.* LCoS-based flexible grid 1×32 wavelength selective switch[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 120605.
陈冉, 陈笑, 陈瀛, 等. 基于 LCoS 的 1×32 端口灵活栅格的波长选择开关[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(12): 120605.
- [5] Eisebitt S, Lüning J, Schlöter W F, *et al.* Lensless imaging of magnetic nanostructures by X-ray spectroholography[J]. *Nature*, 2004, 432(7019): 885-888.
- [6] Falldorf C, Agour M, Kopylov C V, *et al.* Phase retrieval by means of a spatial light modulator in the Fourier domain of an imaging system [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(10): 1826-1830.
- [7] Zhu Y H, Shanker A, Tian L, *et al.* Low-noise phase imaging by hybrid uniform and structured illumination transport of intensity equation [J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26696-26712.
- [8] Cai D M, Yang H Z, Ling N, *et al.* Diffraction effect of liquid crystal spatial light modulator using for beam deflection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(4): 491-495.
蔡冬梅, 杨慧珍, 凌宁, 等. 液晶空间光调制器用于光束偏转控制的衍射效应[J]. *中国激光*, 2008, 35(4): 491-495.
- [9] Chen W B, Zheng Z R, Gu P F, *et al.* Performance measurement of broadband, wide-angle polarizing beam splitter [J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2007, 8(2): 176-179.
- [10] Hu Q G, Liu D M, Zhang D, *et al.* A novel wavelength selective switch using micro-electromechanical systems technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1168-1172.
胡强高, 刘德明, 张均, 等. 一种基于微机电系统技术的新型波长选择开关[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 1168-1172.
- [11] Lin X Y. ZEMAX optical design super learning manual[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014: 108-169.
林晓阳. ZEMAX 光学设计超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 108-169.
- [12] Bai Y C, Chen X X, Zeng J, *et al.* An optimization algorithm for polarizer-free imaging of liquid crystal lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815015.
白一晨, 陈晓西, 曾俊, 等. 液晶透镜无偏振片成像的优化算法[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815015.
- [13] Zhao Z X, Xiao Z X, Zhang H Y, *et al.* Self-interference for spatial light modulator phase modulation characteristics by liquid crystal grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 061204.
赵自新, 肖昭贤, 张航瑛, 等. 液晶光栅自干涉测量空间光调制器相位调制特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 061204.
- [14] Yang H, Tong S F, Zhang L, *et al.* Beam deflection control technology based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 110603.
杨赫, 佟首峰, 张磊, 等. 基于液晶空间光调制器的光束偏转控制技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 110603.
- [15] Peng L, Sang X Z, Yan B B, *et al.* Tunable dual-wavelength fiber laser based on an opto-VLSI processor and four-wave mixing in a photonic crystal fiber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(4): 935-938.
- [16] Zhang N. Three-piece Fourier transform lens design [J]. *Informatization Construction*, 2016(4): 291, 293.
张宁. 三片式傅里叶变换镜头设计[J]. *信息化建设*, 2016(4): 291, 293.