

文章编号: 0253-2239(2008)09-1735-05

新型平面集成光学相关器设计与分析

刘加勇 徐 平 徐海东 张旭琳 王 冰 杨 靖

(深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

摘要 基于微光学与二元光学技术,设计了一种新型的平面折叠式光学相关器,将相关器中组成 $4f$ 系统的傅里叶变换透镜、全息匹配滤波器、输入面和输出面集成到一个平面器件上,与另一平面偏振反射镜构成一个反射型的平面光学系统。讨论了相关器的系统结构设计、系统参数的设计,给出了具体的设计模型,计算出其体积可减小至约 12 cm^3 。利用菲涅耳衍射数值模拟方法对系统的图像识别过程进行了仿真,得到了良好的相关输出结果,证实平面集成光学相关器具有很好的识别性能。

关键词 集成光学; 光学相关器; 计算全息匹配滤波器; 空间光调制器; 二元光学

中图分类号 TN202 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082809.1735

Design and Analysis of Novel Planar Integrated Optical Correlator

Liu Jiayong Xu Ping Xu Haidong Zhang Xulin Wang Bing Yang Jing

(College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract Novel planar folding optical correlator is proposed by means of micro-optical and binary optical techniques. The Fourier transform lenses, holographic matched filter, input plane and output plane are integrated on a common planar element. A reflective planar optical system is constructed by the correlator and a planar polarized mirror. The system structure and parameter design of this planar system are described, and a concrete model is proposed, with its volume reduced to about 12 cm^3 . At last, image recognition process of this correlator is simulated by using Fresnel diffractive method and gains excellent results, which proves the recognition capability of the system.

Key words integrated optics; optical correlator; computer holographic matched filter; spatial light modulator; binary optics

1 引 言

许多光电相关识别系统都存在体积庞大、各元件分离固定、安装困难、成本高的缺点,很大程度上限制了它的实用化发展。因此,研究设计结构微型化、成本更低的光学相关器成为当今的热点。美国 Litton 公司先后推出了三代微型加强光学相关器(MROCTM)系列产品^[1~3],采用了反射式折叠光路设计,在输入和滤波面都应用了反射型液晶空间光调制器(FLC-SLM),可实现 256×256 图像的输入,体积减小到了 260 cm^3 。美国喷气推进实验室(JPL)于 2005 年报导了研发的小型便携式 512×512 灰度光学相关器^[4],体积达到了 $6.5\text{ cm} \times 3.5\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 。天津

大学研制出了一种小型多功能光学相关器^[5],采用了反摄远透镜设计和空间折叠的结构,使体积减小到 $45\text{ cm} \times 24\text{ cm} \times 12\text{ cm}$ 。在微光学与二元光学技术研究的基础上^[6~9],本文设计了一种新型的平面集成光学相关器,采用平面折叠反射式光路设计思想,将光学相关器中组成 $4f$ 系统的傅里叶变换透镜、全息滤波器、输入面和输出面全部集成到一个平面器件上,能满足光学相关器系统集成化和成本更低的要求。

2 新型平面集成相关器的系统结构

2.1 系统结构设计

范德卢格特相关器(Vander Lugt correlator,

收稿日期: 2008-01-18; 收到修改稿日期: 2008-03-11

作者简介: 刘加勇(1982—),男,硕士研究生,主要从事微小光学与器件、信息光学等方面的研究。

E-mail: ljyjiajia@163.com

导师简介: 徐 平(1962—),男,教授,博士,主要从事微小光学与器件、信息光学等方面的研究。

E-mail: xuping@szu.edu.cn (通信联系人)

VLC)的基本结构为光学 $4f$ 系统,其体积庞大,各个光学元件都分离固定,调节困难,对准精度低,对防震的要求非常高。本文提出用微光学与二元光学技术设计的平面集成光学相关器可以克服以上缺点,它将 VLC 中组成 $4f$ 系统的傅里叶变换透镜、匹配空间滤波器(Matched spatial filter, MSF)、输入平面和输出平面都集成到一个平面器件上,只用一个小型的平面光学系统代替来实现图像的相关识别,其系统结构如图 1 所示。

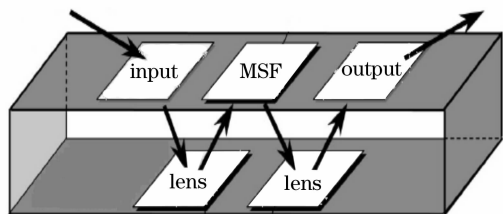


图 1 平面集成光学相关器结构图

Fig. 1 Structure of planar integrated optical correlator

伴随着空间光调制器(Spatial light modulator, SLM)、电荷耦合器件(Charge coupled device, CCD)等光电器件的快速发展,光学相关识别迈入了光电混合相关识别的新阶段。为此对图 1 结构做了如下改进:采用了高速、高分辨率的 SLM 作为输入物体的载体以及计算全息滤波器函数的输出器件,输出探测平面采用高速、高分辨率的 CCD,如图 2 所示。利用二元光学技术可将整个器件制作在同一块片基上(例如可采用熔石英材料,根据工作波段确定),与偏振反射镜组成一个反射折叠式的平面集成光学相关识别系统。

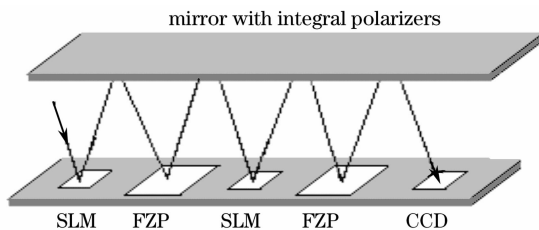


图 2 改进的新型平面集成光学相关器结构图

Fig. 2 Modified structure of novel planar integrated optical correlator

2.2 系统结构参数设计

提出的光电相关识别系统是由两个平面反射器件组成的小型集成化平面光学系统,其中含有反射式 SLM、离轴菲涅耳波带(Fresnel zone plate, FZP)透镜等器件。该设计拟采用光波长 $\lambda = 650 \text{ nm}$ 的半导体激光器,输入平面器件和滤波平面器件拟采用反射式 SLM,取分辨率为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$,

像元大小为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 。

2.2.1 菲涅耳波带透镜参数设计

在平面反射系统中,FZP 需具有反射特性以改变传播方向^[10],于是在其下表面镀上高反射膜,倾斜入射光由于折返光路两次经过 FZP,其光路可近似等效为如图 3 所示,由双透镜等效焦距公式可知,平面反射系统中 FZP 的等效焦距为 $f = f'/2$ 。

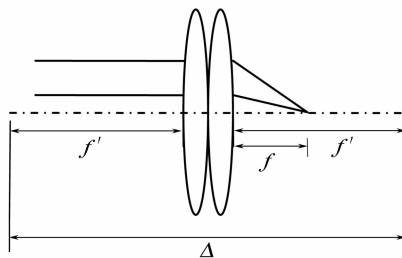


图 3 双透镜的等效焦距

Fig. 3 Equivalent focus of double lens

该系统中透镜的等效焦距 f 满足^[11]

$$f = Np_1p_2/\lambda, \quad (1)$$

式中 N 为滤波平面 SLM 的像素个数, p_1 、 p_2 分别为输入和滤波平面的 SLM 的像素大小。因此,透镜焦距由 SLM 的像素大小、像数个数及光波波长决定。代入已知参数可计算出 $f = 88.6 \text{ mm}$, $f' = 177.2 \text{ mm}$ 。

为了让所有入射光以最高空间频率 $1/(2p_1)$ 经过 SLM 反射^[11],FZP 的直径 D 应满足 $D = Np_1 + Np_2 = 2Np$,代入已知参数得 $D = 7.68 \text{ mm}$ 。再由 $F = f'/D$ 可算得 FZP 的 F 值等于 23.1。

2.2.2 平面光学系统的倾斜入射角

入射光通过反射式 SLM 后在其反射方向上会产生一系列的衍射级次,这是由 SLM 像素间存在小间隙导致的^[12]。除有用衍射级次之外,其他级次的杂散光反射到 CCD 探测面必将降低相关器的信噪比。因此为了消除杂散光的影响,光线的倾斜入射角大小及 SLM、FZP 和 CCD 等器件的间距需要合理的设计。

光线经过 SLM 和 FZP 之间的衍射过程如图 4 所示,设 α 为入射光线的倾斜角,SLM 和 FZP 的中心间距为 l 。要使光线经过 SLM 后只有零级光经反射镜照射到透镜表面:

$$\sin \alpha = 2NP/f, \quad (2)$$

从而得到 $\alpha = \arcsin(2NP/f) \approx 2\lambda/p$,代入已知值得到 $\alpha = 5^\circ$ 。因此,整个系统展开图可视为近轴光路系统。

图 5 为平面系统的离轴光路示意图,可知 FZP 中心至 SLM 中心的距离 l 具有关系 $\sin \alpha = l/f$,因此可算得 $l = 2NP$ 。在偏振反射镜下表面光反射的

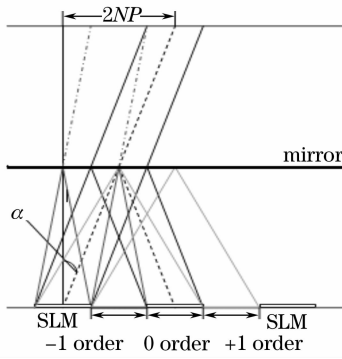


图 4 光线经过 SLM 后的衍射分布图

Fig. 4 Diffractive distribution of light passing through SLM

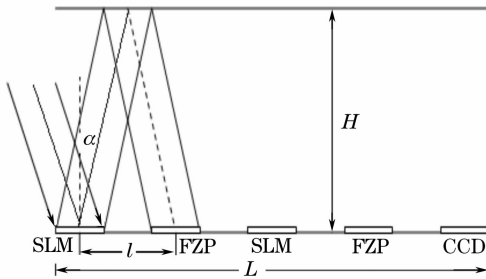


图 5 平面系统的离轴光路示意图

Fig. 5 Off-axis light path of planar system

位置处放置四块与 SLM 相同形状和大小的光栏，并在 SLM 和透镜上表面加上同样的光栏，从而可避免其他级次的主要杂散光反射到 CCD 探测面，避免降低系统的信噪比，影响到系统的识别性能。

2.2.3 系统体积

由图 5 可知整个光学相关器(光学系统)可近似为一个长方体,其长度 $L=9NP$,宽度 $W=2NP$,高度 H 由 FZP 的焦距及 SLM 中心与透镜中心的距离 l 决定,

$$H = [Np^2 / (2\lambda)][1 - (2\lambda/p)^2]^{1/2}, \quad (3)$$

光学相关器的系统体积为

$$V = HWL = (9N^3 p^4 / \lambda)[1 - (2\lambda/p)^2]^{1/2}. \quad (4)$$

假如采用的光波长 $\lambda = 650 \text{ nm}$,空间光调制器为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$,像素大小 p 分别为 $36 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ 、 $8 \mu\text{m}$ 时,由(4)式可得相应的光学相关器体积分别为 390 cm^3 、 11.7 cm^3 、 0.9 cm^3 ,可见,光学相关器的体积随着空间光调制器像素的减小而变小。

然而,平面光学系统的离轴角 $\alpha = 2\lambda/p$,像素大小 p 分别为 $36 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ 、 $8 \mu\text{m}$ 时,可得相应的离轴角 α 分别为 2° 、 4.9° 、 9.3° ,其值随着 p 的减小而增大。离轴角度越大,光学系统的成像质量越差,势必会影响相关器的性能。因此,为了解决空间光调制器的像素大小导致的光学相关器微型化程度与其

识别性能间的矛盾,系统的离轴角应保证在 $4^\circ \sim 5^\circ$ 范围^[13],这表明空间光调制器像素的最优取值为 $14.9 \sim 18.6 \mu\text{m}$ 。这也是本方案的空间光调制器取值为 $15 \mu\text{m}$ 的理由,此时系统的离轴角度约为 5° 。

将已求得的参数代入(4)式可算出光学相关器(不含激光器及其他外围的驱动模块)的体积约为 12 cm^3 。因此设计的光学相关器在系统集成度、结构微型化及识别性能方面都更有优势。

3 像差分析及衍射透镜的设计

提出的平面光学系统采用衍射光学元件组成的平面型系统,旨在克服通常光学系统的多个光学元件安装调整困难的缺点,并满足现代光电混合处理系统小型、集成结构的需求。光学相关器系统的输入平面上任一点 (x_s, y_s) 在傅里叶平面上的场分布为 $u_1(x, y) = \exp[ikW_1(x, y)]$,若在输出平面上 $x_0 = -x_s, y_0 = -y_s$ 点产生一个完整点像,则有光场 $u_2(x, y) = \exp[ikW_2(x, y)]$ 。

设以波函数 W_{ab} 描述系统的像差,则平面系统的波像差函数 $W_{ab} = W_1 - W_2$ 。由于系统属于平面对称结构,故其彗差和畸变对输入面上的所有物点都自动消失,仅存在球差、场曲和像散。为了消除系统球差和对称像散,平面光学系统中的菲涅耳波带透镜表面的波带形状须由圆形修正为椭圆^[14],此时离轴 FZP 的透射率函数

$$t(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2 \cos^2 \alpha + y^2}{2f} \right)^{[15]}.$$

因此,与系统有关的像差仅剩像散和场曲。为简化运算,利用泰勒级数展开并取至第三项推导可得像散和场曲像差分别为

$$W_{ast} = -\left(\frac{1}{2f^3}\right)(xx_s \cos^2 \alpha + yy_s)^2, \quad (5)$$

$$W_{fc} = -\left(\frac{1}{4f^3}\right)(x^2 \cos^2 \alpha + y^2)(x_s^2 \cos^2 \alpha + y_s^2). \quad (6)$$

与通常的对称光学成像系统的像差表达式相

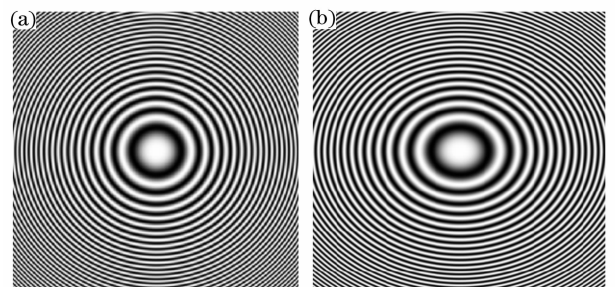


图 6 菲涅耳波带透镜。(a)圆形,(b)椭圆

Fig. 6 Fresnel zone plate lens. (a) circular, (b) elliptical

比,仅增加了 $\cos^2\alpha$ 因子^[14]。

利用计算机模拟出波带形状分别为圆形和椭圆的菲涅耳波带透镜,如图 6 所示。该离轴 FZP 的傅里叶变换在 x 和 y 方向具有不同的变换因子,其傅里叶变换可表示为^[15]

$$F(x_0, y_0) = C \iint f(x, y) \times \exp\left\{-i2\pi\left[\frac{x_i x_0 \cos^2\alpha}{\lambda f} + \frac{y_i y_0}{\lambda f}\right]\right\} dx_i dy_i, \quad (7)$$

式中 C 为常数, $f(x, y)$ 为输入函数。

设计的离轴菲涅耳波带透镜的参数为:工作波长 $\lambda = 650 \text{ nm}$;焦距 $f = 177.2 \text{ mm}$;方形面积大小:

$7.68 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$;台阶数 $L = 8$;离轴工作角 $\alpha = 5^\circ$ 。用计算机分别模拟连续菲涅耳波带透镜和八台阶离轴菲涅耳波带透镜的三维形貌如图 7 所示。

假定采用的片基为熔石英材料,即折射率 $n = 1.46$,由文献[16]中 FZP 掩模板的设计公式可计算出透镜的加工参数:环带数 $M = 1024$;最小线宽 $v = 1.9 \mu\text{m}$;衍射效率 $\eta = 95\%$;刻蚀深度 $h_1 = 0.707 \mu\text{m}$, $h_2 = 0.353 \mu\text{m}$, $h_3 = 0.177 \mu\text{m}$ 。

从制作加工参数可知透镜的最小线宽大小合适,不会有太多的加工难度,实验室设备的加工精度能满足制作要求,从而可减小由加工误差对器件性能的影响。

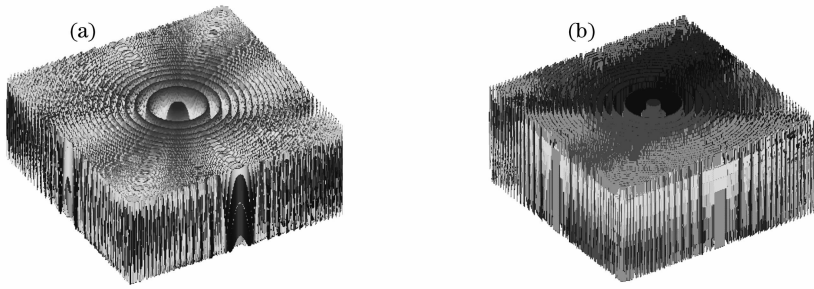


图 7 连续菲涅耳波带透镜(a)和八台阶化 FZP (b)的三维形貌

Fig. 7 Three-dimensional profile of sequential FZP (a) and eight-stepped FZP (b)

3 仿 真

采取菲涅耳衍射的快速实现方法——卷积

法^[17],分步完成整个系统的图像识别过程的仿真。相关器的识别仿真步骤概括如下:

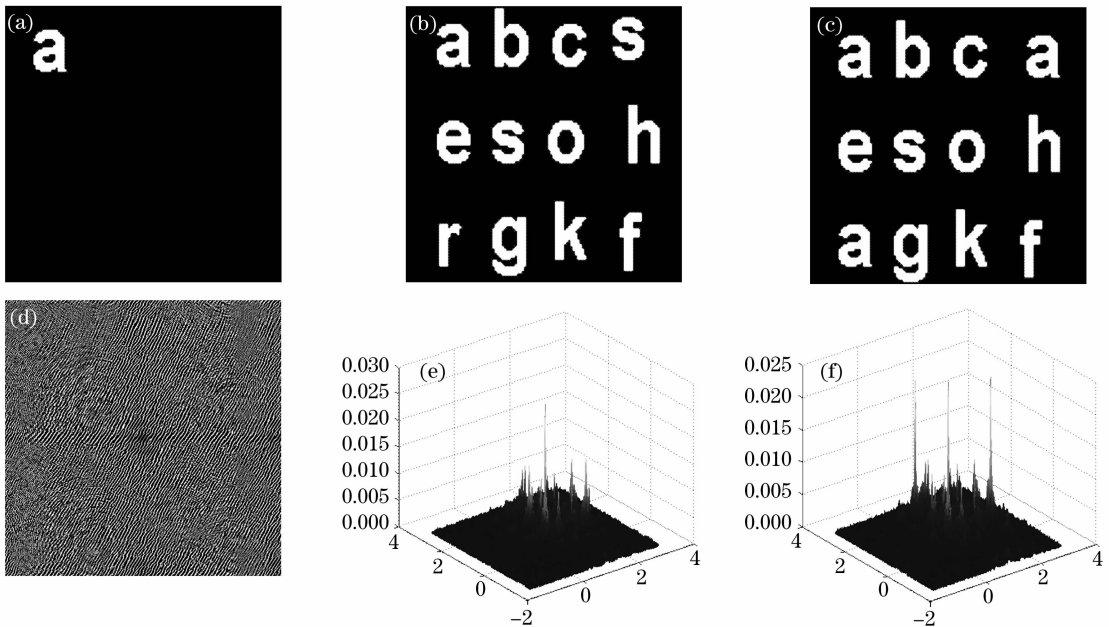


图 8 (a)输入参考图像,(b),(c)待识别图像,(d)二元振幅补偿滤波器,(e),(f)分别对应(b),(c)的相关识别结果

Fig. 8 (a) Input image, (b), (c) images to be recognized, (d) binary amplitude-compensating filter, (e), (f) correlation recognition output of (b) and (c)

1) 将参考物体加载到输入 SLM, 倾斜平行光照射物体, 经过菲涅耳衍射至第一个菲涅耳波带透镜, 与 FZP 的透射率函数做相乘运算, 再经菲涅耳衍射至滤波平面的 SLM。

此时, 利用二元振幅补偿滤波算法制成匹配滤波器储存在滤波平面的 SLM 上, 用于与待识别输入图像做匹配运算。

2) 将待识别物体加载到输入 SLM, 重复第一步后得到的函数与匹配滤波器做卷积运算。

3) 卷积运算后经菲涅耳衍射至第二个 FZP, 与其透射率函数相乘, 再经一次菲涅耳衍射至输出平面, 即可得到最后的相关识别结果。如果在输出面上得到相关尖峰, 说明待识别图像与参考图像存在相同信息, 否则说明两幅图像不相关。

如图 8(a) 所示, 将含有 a 字样的 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 二值图像作为参考图像, 图 8(d) 为依据参考图像制成的二元振幅补偿滤波器。待识别图像 (b), (c) 分别做上述仿真步骤, 便可在 CCD 平面得到相关识别结果如 (e), (f) 所示。(b) 图像中有一个字母 a, 故接收面探测到一个尖锐的自相关峰, 而 (c) 待识别图像中只有三个字母 a, 故接收面能探测到三个自相关尖峰, 且这些输出相关峰很尖锐, 系统的信噪比也较高。仿真结果证实了平面集成光学相关器具有良好的识别性能。

5 结 论

提出了一种平面集成化光学相关器的具体设计方案, 讨论了相关器的系统结构设计、系统参数的设计, 给出了具体的设计模型, 其体积可减小至约 12 cm^3 , 与其他光学相关器模型相比, 集成化光学相关器的光学系统体积可做到更小, 结构平面集成化有利于利用模压技术大规模复制, 降低制作成本。利用菲涅耳衍射数值模拟方法对系统的图像识别过程进行了仿真, 得到了良好的相关输出结果, 证实了平面集成光学相关器具有很好的识别性能。

参 考 文 献

- 1 J. P. Karins, S. A. Mills, N. J. Szegedi *et al.*. Miniature ruggedized optical correlator for flight testing[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2237**: 48~53
- 2 J. P. Karins, S. A. Mills, J. P. Ryan *et al.*. Second generation miniature ruggedized optical correlator[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3073**: 128~137
- 3 D. T. Carrott, G. Mallaley, R. B. Dydyk *et al.*. Third generation miniature ruggedized optical correlator (MROC™) module[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3386**: 38~44
- 4 Tien-Hsin Chao, Jay Hanan, Hanying Zhou *et al.*. Portable 512×512 grayscale optical correlator[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5816**: 23~31
- 5 Hao Yongjie, Liu Wenyao, Lu Yao *et al.*. Folding integration optical correlator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(6): 31~34
- 6 郝永杰, 刘文耀, 路 烁 等. 折叠式集成化光学相关器[J]. *光电工程*, 2002, **29**(6): 31~34
- 7 Xu Ping, Tang Jiyue, Guo Lurong *et al.*. Deep etched binary optical element[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(12): 1276~1801
- 8 徐 平, 唐继跃, 郭履容 等. 深蚀刻二元光学元件[J]. *光学学报*, 1996, **16**(12): 1276~1801
- 9 Xu Ping, Zhang Xiaochun, Guo Lürong. Fabrication errors analysis and simulation of binary optical element [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(6): 833~838
- 10 徐 平, 张晓春, 郭履容. 二元光学制作误差分析与模拟[J]. *光学学报*, 1996, **16**(6): 833~838
- 11 Ping Xu, Junbo Yang, Haixuan Huang *et al.*. The theoretical analysis and design of perfect shuffle interconnection using micro-optical array element[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5636**: 334~340
- 12 Ping Xu, Haixuan Huang, Kai Wang *et al.*. Realization of optical perfect shuffle with microoptical array element[J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(3): 809~816
- 13 Zheng Zhenrong, Sun Xutao, Gu Peifu *et al.*. Design of objective lens with reflective spherical Fresnel zone plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1483~1487
- 14 郑臻荣, 孙旭涛, 顾培夫 等. 应用反射型球面菲涅耳波带片的成像物镜设计[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1483~1487
- 15 Michael J. O'Callaghan, Stephen H. Perlmutter. Compact optical processing systems using off-axis diffractive optics and FLC-VLSI spatial light modulators [C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2848**: 72~80
- 16 Ye Biqing, Chen Jun, Norihiro Fukuchi. Oblique-Incidence characteristic of parallel-aligned nematic liquid crystal spatial light modulator[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 587~590
- 17 叶必卿, 陈 军, 福智昇央. 斜入射液晶空间光调制器的特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 587~590
- 18 Michael J. O'Callaghan, David J. Ward, Stephen H. Perlmutter *et al.*. Highly integrated compact optical correlators using FLC-VLSI spatial light modulators and diffractive optics[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3289**: 60~67
- 19 J. Jahns, A. Huang. Planar integration of free-space optical components[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(9): 1602~1605
- 20 S. Reinhorn, S. Gorodeisky, A. A. Friesem *et al.*. Fourier transformation with a planar holographic doublet[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(5): 495~497
- 21 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. *Binary Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 89~110
- 22 金国藩, 严瑛白, 郭敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 89~110
- 23 Deng Shaogeng, Liu Liren, Lang Haitao *et al.*. Space-variant Fresnel joint transform correlator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 621~624
- 24 邓绍更, 刘立人, 郎海涛 等. 空变菲涅耳联合变换相关器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 621~624