

文章编号: 1001-3806(2011)03-0356-04

## 基于亚波长偏振光栅的空间光桥接器设计

万玲玉,班卫华,卢智勇

(广西大学 物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

**摘要:** 为了研究自由空间的相干光探测,基于亚波长偏振光栅的衍射和偏振特性,提出了一种新的 $2 \times 4$ 的 $90^\circ$ 空间光桥接器。该桥接器主要由一个亚波长偏振光栅、两个 $\lambda/2$ 波片和两个偏振分束器构成。结果表明,通过亚波长偏振光栅将信号光束和本振光束进行空间光桥接,通过左旋和右旋圆偏振光在偏光分离时的相位性质实现所需的相位关系,避免了传统空间光桥接器中对分光元件的相位要求,易于实现稳定的相位输出,在空间激光相干探测系统中有潜在应用。

**关键词:** 光学器件;光学相干探测;光学桥接器;亚波长偏振光栅; $90^\circ$ 相移

**中图分类号:** TN253;O436.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.03.018

### Design of optical hybrids based on a subwavelength polarization grating

WAN Ling-yu, BAN Wei-hua, LU Zhi-yong

(College of Physics Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** For the coherent detection of laser beams in free space, a new  $2 \times 4$   $90^\circ$  optical hybrid for freely propagating laser beams was proposed based on the diffraction and polarization characteristics of a subwavelength polarization grating. It mainly consists of a subwavelength polarization grating, two half-wave-plates and two polarization splitters. The split and recombination of the signal beam and the local oscillator beam are achieved through the subwavelength polarization grating. The desired phase relation is obtained when orthogonally polarized beam components of the left-circularly and right-circularly polarized light are spatially separated under given conditions so that the rigid phase requirement for the beam splitters in traditional space optical hybrids is avoided and stable phase output can be obtained easily. It has potential applications in field of free-space laser coherent communication.

**Key words:** optical devices; optical coherent detection; optical hybrid; subwavelength polarization grating;  $90^\circ$  phase shift

### 引言

在空间激光通信系统中,相干光探测技术是提高接收机灵敏度的有效方法之一,一直是国内外研究的重要课题。光学桥接器是相干光通信系统的关键器件,它的主要功能是实现信号光束和本振光束之间的分光耦合,并使之产生所需的相移,其性能在很大程度上影响着相干接收性能。光学桥接器有 $2 \times 2$ 的 $90^\circ$ , $2 \times 2$ 的 $180^\circ$ 和 $2 \times 4$ 的 $90^\circ$ 等几种类型,其中 $2 \times 4$ 的 $90^\circ$ 光学桥接器使平衡接收机具有理论上的最佳探测效率而应用最为广泛。目前所发展的 $2 \times 4$ 的 $90^\circ$ 光学桥接器,有波导型<sup>[1-5]</sup>、光纤耦合型<sup>[6-8]</sup>和自由空间

传播型<sup>[9-10]</sup>,前两种类型主要针对光纤通信系统开发,由于在空间激光通信系统中,光学桥接器不仅需要输出通信信息,还需要输出位置信息,因此,需要自由空间传播型的空间光桥接器。在现有的空间光桥接器方案中,主要采用波片和分束器实现,参考文献[9]和参考文献[10]中提出了基于偏振分束器和非偏振分束器的两种方案,但无论是哪种方案,都对用于分光耦合的分束器有严格的相位条件要求。众所周知,目前并无有效的方法对分光元件进行相位的控制,为得到相干探测平衡接收所需的相位关系,通常是通过旋转 $\lambda/4$ 波片的方法进行调整,但这样会调开分光比,从而影响后面的平衡接收性能,因此需要发展新的空间光桥接器方案。原理上,光学桥接器可由光分束/合束器和相移器所组成,光栅的许多特性满足光学桥接器的功能需求,在前面的工作中<sup>[11]</sup>,作者曾提出了一种差动光栅空间光桥接器,该方案通过光栅的衍射分光进行光束的空间桥接,同时利用光栅空间频率的差动产生衍射光的相移,差动量的精度决定着光桥接器的相移精度,实际应用中相移不易调节。在此,作者提出亚波长偏振光栅空间光桥接器新

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10964001);中国科学院空间激光通信及检验技术重点实验室开放课题资助项目

作者简介:万玲玉(1975-),女,副教授,博士,主要从事衍射光学、晶体光学和空间光通信方面的研究。

E-mail: wanlingyu75@126.com

收稿日期:2010-07-14;收到修改稿日期:2010-08-29

方案,利用亚波长偏振光栅的偏振衍射特性实现偏振分束以及合束功能,通过左旋和右旋圆偏振光在偏光分离时的相位性质实现所需的相移,该方案避免了传统空间光桥接器中对分束器的相位条件要求,也克服了原有方案中相移量不易调整的缺点,下面在简单介绍亚波长偏振光栅的衍射和偏振特性的基础上,对该空间光桥接器进行器件设计和原理说明。

### 1 亚波长偏振光栅特性

光栅周期小于入射光波长的光栅称为亚波长光栅,亚波长偏振光栅具有特殊的偏振衍射特性,可以实现偏振、分束、增透、高反、窄带滤波等功能。亚波长偏振光栅按光栅周期的空间变化可以分为 4 种类型:1 维结构、2 维结构、准周期结构和连续结构,其中连续结构的偏振光栅,其光栅矢量  $\vec{K}(x,y)$  在一个周期  $d$  内连续变化,可以对光波偏振态进行周期性调制,实现偏振光的控制,合理应用它的衍射特性和偏振特性,可实现空间光桥接器的部分功能要求。

#### 1.1 衍射特性

如图 1 所示的亚波长偏振光栅,图中  $E_{LO}$  为本振

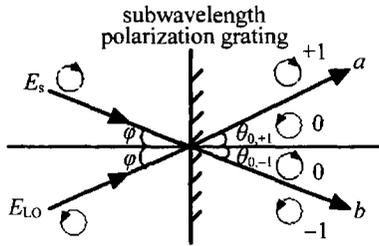


Fig. 1 Diffraction diagram of subwavelength polarization grating (S-G)

光的光场复振幅,  $E_s$  为信号光的光场复振幅。入射角和衍射角之间的关系满足光栅方程:

$$\sin\varphi \pm \sin\theta_m = \frac{m\lambda}{\Lambda} \quad (1)$$

式中,  $m$  为衍射级次,  $\varphi$  为入射角,  $\theta_m$  为  $m$  级衍射角,  $\Lambda$  为光栅周期,  $\lambda$  为入射光波长。由 Bragg 条件可知,当入射角与衍射角相等时,该级衍射效率最大,所以入射角完全由波长和光栅周期决定。在大部分区域,入射角越大,衍射效率值越大。但是衍射分光比与入射角无关。

对连续亚波长介质偏振光栅<sup>[12-13]</sup>,其衍射光仅存在 3 个级次,衍射光场可分别表示为<sup>[14-15]</sup>:

$$T_{-1} = \frac{1}{4}(t_x - t_y) [E_x + iE_y \exp(i\delta)] \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_0 = \frac{1}{2}(t_x + t_y) \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \exp(i\delta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_{+1} = \frac{1}{4}(t_x - t_y) [E_x - iE_y \exp(i\delta)] \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $E_x$  和  $E_y$  分别表示沿  $x$  轴和  $y$  轴的电场分量,  $\delta$  为  $x$  轴和  $y$  轴电场分量的相位差,  $t_x$  和  $t_y$  分别是 TE 偏振(电场矢量平行于刻槽方向)和 TM 偏振(电场矢量垂直于刻槽方向)入射时的复振幅透射系数,须满足  $|t_x| \leq 1$  和  $|t_y| \leq 1$ ,如果忽略光栅的吸收等损耗,则有  $t_x = 1, t_y = \exp(i\Delta\varphi), |t_x| = |t_y| = 1$ ,其中  $\Delta\varphi$  为由光栅产生的相位延迟。

各级衍射效率分别为:

$$\eta_0 = \frac{1}{4} |t_x + t_y|^2 \quad (5)$$

$$\eta_{\pm 1} = \frac{1}{8} |t_x - t_y|^2 \left[ 1 \pm \frac{2|E_x| |E_y| |\sin\delta|}{|E_x|^2 + |E_y|^2} \right] \quad (6)$$

若  $|E_x| = |E_y|$ ,则(6)式可以简化为:

$$\eta_{\pm 1} = \frac{1}{8} |t_x - t_y|^2 [1 \pm \sin\delta] \quad (7)$$

从(5)式、(6)式可看出,通过设置入射光相位差  $\delta$  及光栅相位延迟  $\Delta\varphi$ (通过相位延迟设置参量  $t_x, t_y$ ) 等参量,可以使光栅具有不同的闪耀特性,并可计算出不同入射光相位差  $\delta$  时各衍射级的衍射效率,若光栅的相位延迟  $\Delta\varphi = \pi/2$ (相当于理想  $\lambda/4$  波片),则有  $t_x = 1, t_y = \exp(i\Delta\varphi) = i$ ,此时根据(5)式~(7)式得入射光相位差  $\delta$  与各衍射级的衍射效率的关系,如图 2 所示。

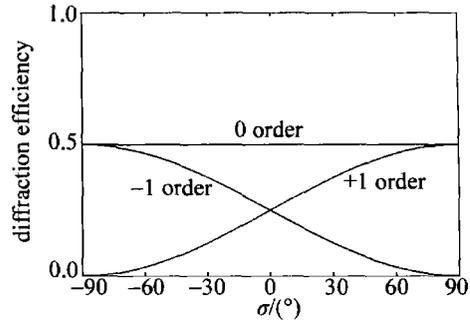


Fig. 2 Relationship between the phase difference  $\delta$  (polarization state) and the diffraction efficiency

由图 2 可看出,当  $\Delta\varphi = \pi/2$  时,0 级衍射效率保持 1/2 不变,而  $\pm 1$  级衍射效率之和恒为 1/2。若入射光为左旋偏振光( $\delta = -\pi/2$ ),光栅只存在 0 级和 -1 级衍射光,其衍射效率各为 1/2,即:  $\eta_0 = \eta_{-1} = \frac{1}{2}$ ;若入射光为右旋偏振光( $\delta = \pi/2$ ),光栅只存在 0 级和 +1 级衍射光,其衍射效率各为 1/2,即:  $\eta_0 = \eta_{+1} = \frac{1}{2}$ ,其衍射分光比为 50:50,可实现光束的等振幅分光,在合适的应用下,能实现空间的光桥接功能。

#### 1.2 偏振特性

连续亚波长偏振光栅只有 0 级和  $\pm 1$  级 3 个衍射级次,其中 0 级的偏振特性始终与输入光相同, -1 级始终为左旋圆偏振光, +1 级始终为右旋圆偏振光,与

输入偏振特性无关,如表1所示<sup>[13]</sup>。由此特性,结合

Table 1 The relation of polarization state between diffracted light and incident light of the subwavelength polarization grating

polarization state of incident light	polarization state of diffracted light		
	-1 order	0 order	+1 order
$ \uparrow\rangle$	$ L\rangle$	$ \uparrow\rangle$	$ R\rangle$
$ L\rangle$	$ L\rangle$	$ L\rangle$	$ R\rangle$
$ R\rangle$	$ L\rangle$	$ R\rangle$	$ R\rangle$

左旋和右旋圆偏振光在偏光分离时的相位性质,可实现光桥接器所需的相位关系。

## 2 2 × 4 90°连续亚波长光栅空间光桥接器

根据上述特性,在合理的设计下,由连续亚波长偏振光栅、λ/2波片和偏振分束元件可以构成一个2 × 4的90°空间光桥接器。基于亚波长偏振光栅实现的空间光桥接器如图3所示,主要由一个亚波长偏振光栅、两

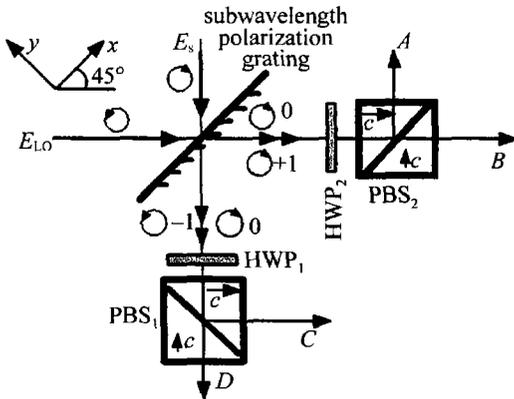


Fig. 3 2 × 4 90° hybrid of continuous subwavelength polarization grating  
个λ/2波片和两个偏振分束元件构成,信号光束 $E_s$ 和

$$E_a = \begin{bmatrix} A_s \eta_{+1} \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s,0}]\} + A_1 \eta_0 \exp\{i[\omega_1 t + \varphi_{1,0} + \frac{\pi}{2}]\} \\ A_s \eta_{-1} \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s,0} + \frac{\pi}{2}]\} + A_1 \eta_0 \exp\{i[\omega_1 t + \varphi_{1,0}]\} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$E_b = \begin{bmatrix} A_s \eta_0 \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s,0}]\} + A_1 \eta_{-1} \exp\{i[\omega_1 t + \varphi_{1,0} + \frac{\pi}{2}]\} \\ A_s \eta_0 \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s,0} + \frac{\pi}{2}]\} + A_1 \eta_{-1} \exp\{i[\omega_1 t + \varphi_{1,0}]\} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, $\eta_0, \eta_{+1}, \eta_{-1}$ 分别是差动光栅的0级,+1级和-1级衍射效率。两束混合光经过λ/2波片进行偏振方向的旋转,当第1个偏振分束器PBS<sub>1</sub>的光轴方向与圆偏振光的x方向相同,而第2个偏振分束器PBS<sub>2</sub>的光轴方向与圆偏振光的x方向成45°角时,在消掉λ/2波片引入的共同相位差后,输出光的光场可写成:

$$E_A = A_s \eta_{+1} \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s,0}]\} + A_1 \eta_0 \times \exp\{i[\omega_1 t + \varphi_{1,0} + \frac{\pi}{2}]\} \quad (12)$$

$$E_B = A_s \eta_{-1} \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s,0} + \frac{\pi}{2}]\} +$$

本振光束 $E_{LO}$ 通过亚波长偏振光栅进行分光耦合,混合光先经过λ/2波片调节偏振方向,再由偏振分束器(polarization beam splitter, PBS)PBS<sub>1</sub>和PBS<sub>2</sub>进行偏光分离,使入射信号光为右旋圆偏振光( $\delta = \pi/2$ ),入射本振光为左旋圆偏振光( $\delta = -\pi/2$ ),且连续亚波长偏振光栅相位延迟 $\Delta\varphi = \pi/2$ ,旋转λ/2波片(half-wave-plate, HWP)HWP<sub>1</sub>使圆偏振光的x方向(平行亚波长偏振光栅刻槽方向)与偏振分束器PBS<sub>1</sub>的其中一个快轴方向平行,旋转λ/2波片HWP<sub>2</sub>使圆偏振光的x方向与偏振分束器PBS<sub>2</sub>的其中一个快轴方向成45°角,这样,信号光和本振光通过亚波长偏振光栅,进行50:50的分光耦合成为相反旋转的混合圆偏振光,通过λ/2波片调整偏振方向后,再经过偏振分离可产生4束具有一定相位关系的信号/本振相干光。

本桥接器原理说明如下,设右旋圆偏振的信号光和左旋圆偏振的本振光分别表示为:

$$\vec{E}_s = \vec{A}_s \begin{bmatrix} 1 \\ e^{i\frac{\pi}{2}} \end{bmatrix} \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s,0}]\} \quad (8)$$

$$\vec{E}_{LO} = \vec{A}_1 \begin{bmatrix} e^{i\frac{\pi}{2}} \\ 1 \end{bmatrix} \exp\{i[\omega_1 t + \varphi_{1,0}]\} \quad (9)$$

式中, $A_s, A_1$ 分别为信号光、本振光的振幅; $\omega_s, \omega_1$ 分别为信号光、本振光的频率; $\varphi_s(t)$ 为信号光相位调制函数; $\varphi_{s,0}, \varphi_{1,0}$ 分别为光桥接器输入端信号光、本振光的初始相位。两束光经过连续亚波长偏振光栅衍射后分光耦合,通过亚波长偏振光栅后,其光场为:

$$A_1 \eta_0 \exp\{i[\omega_1 t + \varphi_{1,0}]\} \quad (13)$$

$$E_C = A_s \eta_0 \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s,0} + \frac{\pi}{4}]\} +$$

$$A_1 \eta_{-1} \exp\{i[\omega_1 t + \varphi_{1,0} + \frac{\pi}{4}]\} \quad (14)$$

$$E_D = A_s \eta_0 \exp\{i[\omega_s t + \varphi_s(t) + \varphi_{s,0} + \frac{3\pi}{4}]\} -$$

$$A_1 \eta_{-1} \exp\{i[\omega_1 t + \varphi_{1,0} + \frac{3\pi}{4}]\} \quad (15)$$

得到对应的4束输出光束的光强分布为:

$$I_A = (A_s \eta_{+1})^2 + (A_1 \eta_0)^2 + 2(A_s \eta_{+1})(A_1 \eta_0) \times$$

$$\cos\left[(\omega_s - \omega_l)t + (\varphi_{s,0} - \varphi_{l,0}) + \varphi_s(t) - \frac{\pi}{2}\right] \quad (16)$$

$$I_B = (A_s \eta_{+1})^2 + (A_l \eta_0)^2 + 2(A_s \eta_{+1})(A_l \eta_0) \times$$

$$\cos\left[(\omega_s - \omega_l)t + (\varphi_{s,0} - \varphi_{l,0}) + \varphi_s(t) + \frac{\pi}{2}\right] \quad (17)$$

$$I_C = (A_s \eta_0)^2 + (A_l \eta_{-1})^2 + 2(A_s \eta_0)(A_l \eta_{-1}) \times$$

$$\cos\left[(\omega_s - \omega_l)t + (\varphi_{s,0} - \varphi_{l,0}) + \varphi_s(t)\right] \quad (18)$$

$$I_D = (A_s \eta_0)^2 + (A_l \eta_{-1})^2 + 2(A_s \eta_0)(A_l \eta_{-1}) \times$$

$$\cos\left[(\omega_s - \omega_l)t + (\varphi_{s,0} - \varphi_{l,0}) + \varphi_s(t) + \pi\right] \quad (19)$$

由(16)式~(19)式可看出,4束相干光之间的相位关系为:  $-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}, 0, \pi$ , 输出光束  $A, C, B, D$  之间两两相邻的相对相位差皆为  $90^\circ$ , 为  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  空间光桥接器。

综上所述,通过合理利用连续亚波长偏振光栅的偏振特性和衍射特性来实现信号光束和本振光束的分束合成,通过  $\lambda/2$  波片调节圆偏振光的  $x$  方向与两个偏振分束器的光轴方向之间的夹角来实现输出光束之间的相移,可以完成  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  空间光桥接器的功能。下面根据亚波长偏振光栅的性质给出一种具体的设计参量,由于入射角完全由波长和光栅周期决定,衍射分光比与入射角无关,当入射角与衍射角相等时,该级衍射效率最大,为减少耦合损耗,提高合成效率,采用衍射效率最大的设计方案,设使用波长为  $1064\text{nm}$ , 使用入射角为  $45^\circ$ , 由光栅方程  $\sin\varphi + \sin\theta_{+1} = 2\sin\varphi = \lambda/\Lambda$  ( $\varphi$  为入射角,  $\theta_{+1}$  为  $+1$  级衍射角,  $\Lambda$  为光栅周期), 得  $\lambda = \sqrt{2}\Lambda$ , 所以光栅周期  $\Lambda = 1064/\sqrt{2}\text{nm} = 752\text{nm}$ , 偏振棱镜  $\text{PBS}_1, \text{PBS}_2, \lambda/2$  波片  $\text{HWP}_1$  和  $\text{HWP}_2$  可直接购买商业产品。

### 3 小结

根据连续亚波长光栅的偏振特性和衍射特性,提出了基于连续亚波长偏振光栅实现空间光桥接器的方法,由连续亚波长偏振光栅的偏振特性和衍射特性来实现信号光束和本振光束的分束耦合,然后通过  $\lambda/2$  波片调节圆偏振光的  $x$  方向与2个偏振分束器的光轴方向之间的夹角来产生输出光束之间所需的相位关系。本方案提出的  $2 \times 4$  的  $90^\circ$  亚波长偏振光栅空间光桥接器,避免了对用于分光耦合桥接用的分束元件

的严格相位要求,在不牺牲分光比的条件下实现稳定的相移输出,在空间相干光探测系统中有潜在的应用前景。

### 参考文献

- [1] HERTZ H. Compact bulk optical  $90^\circ$  hybrid for balanced phase diversity receivers[J]. Electronics Letters, 1989, 25(22): 11-12.
- [2] NORIMATSU S J, TAKACHIO N, INOUE Y, *et al.* An optical  $90^\circ$ -hybrid balanced receiver module using a planar lightwave circuit[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6(6): 737-740.
- [3] CHO P S, HARSTON G, KERR Ch J, *et al.* Improvement of coherent homodyne detection performance using time-gated amplification and  $\text{LiNbO}_3$  optical  $90^\circ$  hybrid [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5403: 762-773.
- [4] HOFFMANN D, HEIDRICH H, WVNKE G, *et al.* Integrated optics eight-port  $90^\circ$  hybrid on  $\text{LiNbO}_3$  [J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(5): 794-798.
- [5] LEEB W R. Optical  $90^\circ$  hybrid for costas-type receivers[J]. Electronics Letters, 1990, 26(18): 1431-1432.
- [6] TSUNETSUGU H, HOSOYA M, NORIMATSU S J, *et al.* A packaging technique for an optical  $90^\circ$ -hybrid balanced receiver using a planar lightwave circuit[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 1996, B19(3): 569-574.
- [7] KAZOVSKY L G, CURTIS L, YOUNG W C, *et al.* All-fiber  $90^\circ$  optical hybrid for coherent communications[J]. Applied Optics, 1987, 26(3): 437-439.
- [8] SEIMETZ M, WEINERT C M. Options, feasibility, and availability of  $2 \times 4$   $90^\circ$  hybrids for coherent optical systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(3): 1317-1322.
- [9] GARRESI R, ZEISS C.  $90^\circ$  optical hybrid for coherent receivers[J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1522: 210-219.
- [10] LEEB W R. Realization of  $90^\circ$  and  $180^\circ$  hybrids for optical frequencies[J]. Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik, 1983, 37(5/6): 203-206.
- [11] BAN W H, WAN L Y, LIU L R. A new optical hybrid of differential grating[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2010, 35(2): 359-362 (in Chinese).
- [12] ZHAO H J, YUAN D R, QIAO N Sh, *et al.* Polarization and blazing characteristics of subwavelength dielectric polarization gratings [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(5): 725-728 (in Chinese).
- [13] ZHAO H J, YUAN D R, WU Zh M. Research development of subwavelength polarization gratings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008(3): 38-43 (in Chinese).
- [14] LU X D, FU K X, WANG Zh H, *et al.* Design of quarter wave-plate using sinusoidal dielectric subwavelength gratings [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 368-370 (in Chinese).
- [15] LAJUNEN H, TERVO, TURUNEN J. High-efficiency broadband diffractive elements based on polarization gratings [J]. Optics Letters, 2004, 29(8): 803-805.