

文章编号: 0253-2239(2008)10-1893-05

光折变 LiNbO_3 晶体中单光栅实现波长解复用方案

刘红梅 阎晓娜

(上海大学理学院物理系, 上海 200444)

摘要 基于光折变 LiNbO_3 晶体中体光栅的各向异性衍射特性, 从理论上分析了利用单个体光栅实现波分解复用技术的方案。在此方案中, 采用 He-Ne 激光束记录一个特定波数的光折变体光栅, 就能够实现远程通信波长在 1550 nm 附近的波长解复用, 理论上可以实现的解复用波段范围是从 1400 nm 到 1650 nm。由于采用了各向异性衍射, 衍射光和读取光的偏振方向互相正交, 提高了信噪比; 另外, 方案中仅需记录单个光栅就可以实现波分复用, 克服了多重光栅复用方案中记录时间复杂性的问题。

关键词 光折变光学; 波长解复用(WdeM); 各向异性衍射; 衍射效率

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082810.1893

Wavelength Demultiplexing Scheme Implemented by Single Volume Grating in Photorefractive LiNbO_3 Crystal

Liu Hongmei Yan Xiaona

(Department of Physics, College of Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract Based on anisotropic diffraction of volume grating in the photorefractive LiNbO_3 crystal, an optical wavelength demultiplexing (WdeM) scheme implemented by a single volume grating is theoretically discussed. By only one grating written by two He-Ne laser beams at a specific wavenumber, the scheme can realize wavelength demultiplexing around telecommunication wavelength 1550 nm, and the theoretical possible wavelength suitable for WDM is from 1400 nm to 1650 nm. For anisotropic diffraction, the polarization of diffracted and readout beams are orthogonal to each other, which can largely improve the signal-to-noise ratio. Besides, only one grating written in the crystal can avoid time-writing complexity in the multiple grating writing.

Key words photorefractive optics; wavelength demultiplexing; anisotropic diffraction; diffraction efficiency

1 引 言

为了充分利用光纤的巨大带宽资源, 波分复用技术(WDM)已广泛用于光通信系统^[1]。目前, 阵列波导光栅(AWG)、薄膜滤波器(TFF)和光纤布拉格光栅(FBG)是应用最广的光学 WDM 技术。这些技术具有很多优势, 例如: 尺寸小、温度敏感性低、成本低和微信道等。然而, 它们插入损耗和偏振损耗大的缺点也是不容忽视的问题。近年来, 光折变体光栅用于实现 WDM^[2~5]的技术因其本身固有的许多优势而备受关注, 如: 窄带滤波、衍射效率高、可

重构和信噪比高等。已有的光折变 WDM 方案都是采用全息复用, 就是在光折变晶体的同一区域记录大量的体全息。当一束含有不同波长的光束照射这些体光栅时, 由于布拉格选择性, 不同波长的光波读取不同的光栅, 衍射到不同方向上, 从而实现光束分离。但是记录多重衍射效率均匀的光折变光栅并非一件简单的事情, 因为曝光和擦除具有同时性^[6]。为解决这一问题, 通常采用指数衰减的曝光时间, 即第一次曝光时间较长, 然后依据指数规律依次缩短曝光时间, 这种方案实际应用起来比较麻烦。

收稿日期: 2008-01-21; 收到修改稿日期: 2008-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(60377017)和上海市重点学科项目(T0104)资助课题。

作者简介: 刘红梅(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事光折变光学、光通信等方面的研究。E-mail: rrfuture@gmail.com

导师简介: 阎晓娜(1970-), 女, 副教授, 主要从事光折变光学、光互连、光开关、微结构光学等方面的研究。

E-mail: xnyan@staff.shu.edu.cn

基于体光栅的各向异性衍射理论,本文提出的波长解复用(WdeM)方案仅需在掺铁 LiNbO₃ 晶体中记录一个体光栅。在 LiNbO₃ 晶体中记录一个波数为特定值 k^* 的光栅,然后不同波长光束以同一特定读出角 θ_r^* 入射在光栅上,衍射光束将沿不同方向出射,从而实现波长解复用。由于仅记录一个体光栅,这就避免了前述多重光栅记录中的问题。而且,在各向异性衍射中,衍射光和读取光的偏振方向是正交的,将会大大提高信噪比。

2 光折变 LiNbO₃ 晶体中各向异性衍射

光折变 LiNbO₃ 晶体中各向异性衍射是本文提出的单光栅实现 WdeM 方案的理论基础。LiNbO₃ 晶体是典型的电光晶体。在这种晶体中,非均匀光照会激发电子从价带向导带迁移,在光暗区被俘获。

这些自由载流子不断迁移、俘获,最终导致正负电荷分离,从而形成了空间电荷场。由于晶体的线性电光效应,使其形成一个相位体光栅。为了观察各向异性衍射,必须满足两个前提条件:非零有效电光系数和相位匹配条件^[7]。

非零有效电光系数即是

$$r_{\text{eff}} = (\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2)(\mathbf{e}_r \cdot \boldsymbol{\delta}_x \cdot \mathbf{e}_s) \neq 0, \quad (1)$$

这里,

$$\boldsymbol{\delta}_x = -\boldsymbol{\varepsilon} \cdot (\mathbf{r} \cdot \mathbf{E}_{\text{sc}}) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_r$ 和 \mathbf{e}_s 分别是两束写入光、一束读出光和一束衍射光的单位偏振矢量, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和 \mathbf{r} 分别是二阶电光张量和三阶电光张量, \mathbf{E}_{sc} 是由于光折变效应产生的空间电荷场。

在光折变 LiNbO₃ 晶体中, $\boldsymbol{\delta}_x$ 为

$$\boldsymbol{\delta}_x = \begin{bmatrix} (-r_{22}E_y + r_{13}E_z)n_o^4 & -r_{22}E_x n_o^4 & r_{51}E_x n_o^2 n_c^2 \\ -r_{22}E_x n_o^4 & (r_{22}E_y + r_{13}E_z)n_o^4 & r_{51}E_y n_o^2 n_c^2 \\ r_{51}E_x n_o^2 n_c^2 & r_{51}E_y n_o^2 n_c^2 & r_{33}E_z n_c^4 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 E_x, E_y 和 E_z 分别是空间电荷场在 x, y 和 z 轴方向的投影, n_o 和 n_c 分别是 o 偏振光和 e 偏振光的折射率。 r_{ij} 是 LiNbO₃ 晶体中的电光张量元。

另外,要实现光折变光栅的最佳衍射,要求光栅波矢 \mathbf{K} 、读出光波矢 \mathbf{K}_r 和衍射光波矢 \mathbf{K}_s 三者之间满足相位匹配条件

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_r - \mathbf{K}_s. \quad (4)$$

在讨论波长解复用方案中,本文针对如图 1 所示的各向异性衍射图进行分析。晶轴 C 垂直于光

栅波矢、读出和衍射光波矢三者所在的平面。在图 1 中,光轴 C 轴平行于 z 轴。

在记录过程中,两波长相同的相干光束以同样的写入角入射到光折变晶体上,由于光折变效应记录一个体光栅,光栅波矢 \mathbf{K} 沿 y 轴方向, λ_w 为读出波长, θ_r 和 θ_s 分别为读出角和衍射角,如图 1(a) 所示。在图 1(b) 的读出方案中,一束光以一定角度照射在光栅上,光束依据各向异性衍射条件衍射,读取光同衍射光的偏振方向垂直。

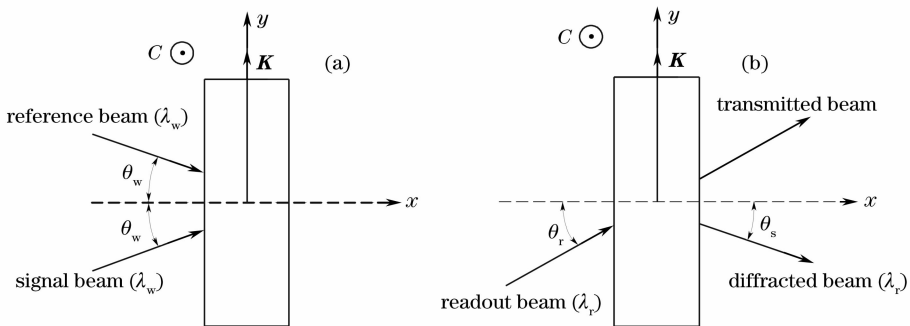


图 1 (a)光栅记录图, λ_w 和 θ_w 为记录光波长和记录角度, (b)各向异性布拉格衍射图

Fig. 1 (a) Diagram for writing a grating in photorefractive LiNbO₃ crystal. λ_w and θ_w are the writing wavelength and angle, (b) diagram for anisotropic Bragg diffraction

在 (x, y) 平面中,光栅矢量 \mathbf{K} 平行于 y 轴,相应的空间电荷场 \mathbf{E}_{sc} 也平行于 y 轴,那么 $E_x = E_z = 0$ 。因此 $\boldsymbol{\delta}_x$ 变成

$$\boldsymbol{\delta}_x = \begin{bmatrix} -r_{22}E_y n_o^4 & 0 & 0 \\ 0 & r_{22}E_y n_o^4 & r_{51}E_y n_o^2 n_c^2 \\ 0 & r_{51}E_y n_o^2 n_c^2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

计算(1)式,(2)式,(5)式发现,如果读出光束是 o 偏振光且 e 偏振光为衍射光束, r_{eff} 非零,这意味着 o 偏振光可以耦合入 e 偏振光,反之亦然。这说明在如图 1 所示的各向异性衍射结构中寻常光和非寻常光之间可以耦合。

3 基于各向异性衍射的 WdeM 理论

本文选择 e 偏振的 He-Ne 激光光束来记录光栅,以 o 偏振光束作为读取光,并且衍射光具有 e 偏振性。考虑到实际的应用,读取与衍射光波长选取在远程通信带宽范围内。各向异性布拉格衍射的波矢图如图 2 所示。

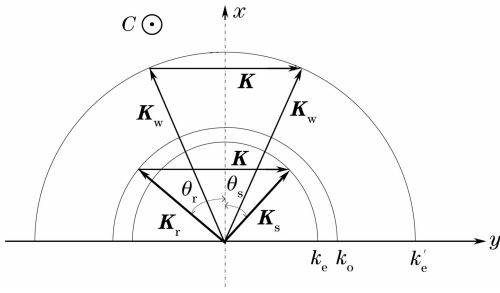


图 2 各向异性布拉格衍射波矢图,相对于 x 轴,顺时针为正方向

Fig. 2 Wave-vector diagram for illustrating anisotropic Bragg diffraction. Assuming x -axis is the reference axis and the angle in clockwise is positive

这里 k'_e, k_0 和 k_e 分别是记录光、读取光和衍射光束波矢面。由于记录光波长小于读取光波长,所以有 $k_e < k_0 < k'_e$, $\mathbf{K}_w, \mathbf{K}_r$ 和 \mathbf{K}_s 分别是记录光、读取光和衍射光波矢。

依据相位匹配条件,在 (x, y) 平面内各向异性衍射的布拉格条件以角度表示为如下形式:

$$k_r \sin \theta_r + k_s \sin \theta_s = 2k_w \sin \theta_w = k, \quad (6a)$$

$$k_r \cos \theta_r = k_s \cos \theta_s, \quad (6b)$$

且

$$k_w = \frac{2\pi n'_e}{\lambda_w}, k_r = \frac{2\pi n_o}{\lambda_r} = k_0 n_o, k_s = \frac{2\pi n_e}{\lambda_r} = k_0 n_e, \quad (6c)$$

其中 n'_e, n_o 和 n_e 分别是 e 偏振记录光、o 偏振读出光和 e 偏振衍射光的折射率, λ_w 和 λ_r 是记录光和读出光波长。 θ_w, θ_r 和 θ_s 分别是记录光、读出光和衍射光的相对于 x 轴的角度。 $k_0 = 2\pi/\lambda_r$ 为读出光在真空中的波数。

由 (6a) 式、(6b) 式可得布拉格读出角 θ_r 和衍射角 θ_s 关于 k/k_0 的函数关系,如图 3 所示。这里选择

$n'_e = 2.200, n_o = 2.229$ 和 $n_e = 2.150$ ^[8]。

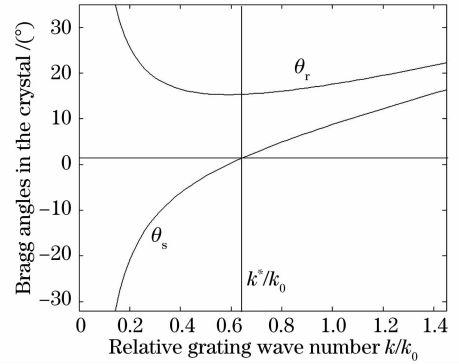


图 3 各向异性衍射中读出角 θ_r 和衍射角 θ_s 的波矢依赖关系图(所有角度均为晶体内计算角度)

Fig. 3 Wave-vector dependence of the readout angles θ_r and diffraction angle θ_s for anisotropic diffraction using the geometry shown in Fig. 2 (all angles are inside the crystal)

从图 3 来看,布拉格角 θ_r 几乎不受 k^*/k_0 的变化量 $\Delta(k/k_0)$ 的影响,而 θ_s 与变化量 $\Delta(k/k_0)$ 密切相关。这种现象可用于记录多重光栅实现光学 WdeM 技术,但是多重光栅中存在的记录问题就会相伴而生。因此本文放弃讨论这种多光栅 WdeM 方案。

进一步研究分析,

$$\frac{k}{k_0} = \frac{2\lambda_r n'_e \sin \theta_w}{\lambda_w}, \quad (7)$$

要记录光栅波数为 k^* (图 3 中出现的 k^*) 的特殊光栅,选择一定的记录波长 ($\lambda_w = \lambda_w^*$),则相应的记录角度也就确定下来了 ($\theta_w = \theta_w^*$)。在这种情况下,分析上式,会发现 λ_r 将是 k/k_0 中唯一的变量。依据等(6)式、(7)式,得到如下关系式:

$$k^* = \frac{2n'_e \sin \theta_w^*}{\lambda_w^*} = \frac{n_o \sin \theta_r + n_e \sin \theta_s}{\lambda_r}, \quad (8a)$$

$$n_o \cos \theta_r = n_e \cos \theta_s, \quad (8b)$$

从数学角度分析,对于光栅波数为 k^* 的特殊光栅,(8a)式、(8b)式表明 θ_r 和 θ_s 分别是 λ_r 的函数。图 4 给出了光栅波数为特定值 k^* 时的图示关系。

从图 4 可以看出在 λ_r^* ($\lambda_r^* = 1550$ nm) 附近,读出角 θ_r 与波长 λ_r 的变化无关,而衍射角 θ_s 与波长 λ_r 的变化量密切相关,且 λ_r 和 θ_s 近似是线性关系。这种现象提供了用于实现 WdeM 复用器设计的可能性。记录一个特殊的光栅(记录参数为 λ_r^* 和 θ_w^*),采用一束包含多个波长的光以 θ_r^* 入射至晶体上,衍射光将沿不同方向偏转。这正是 WdeM 系统的基本工作原理。

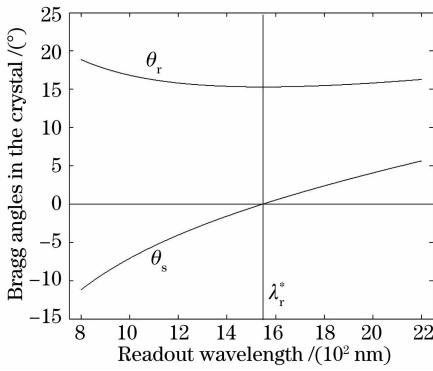


图 4 对于光栅波数为 k^* 的特殊光栅,读出角和衍射角分别与读出波长之间的函数关系图

Fig. 4 Relation of the readout and diffraction angles with respect to the readout wavelength as all readout beams read the same specific grating

依据图 3 和图 4,图 5 阐释了单光栅实现 WdeM 的方案。其中 $\lambda_{r1}, \lambda_{r2}, \dots, \lambda_r^*, \dots, \lambda_{rn}$ 为读出光波长,且 $\lambda_{r1} < \lambda_{r2} < \dots < \lambda_r^* \dots < \lambda_{rn}, \theta_{s1}, \theta_{s2}, \dots, \theta_s^*, \dots, \theta_{sn}$ 为相应的衍射角(晶体内角度)。

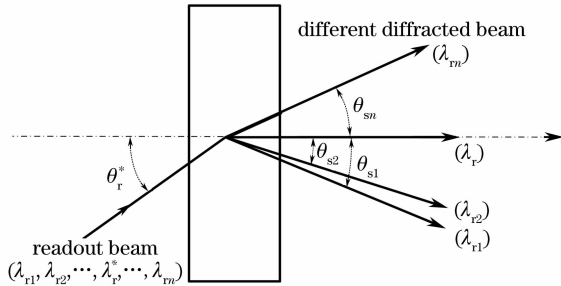


图 5 波分复用方案示意图

Fig. 5 Sketch map for wavelength division multiplexing

在实际应用中,如果所有衍射光束具有近似均匀的衍射光强,那么此方案就可以实现 WdeM。

4 计算和讨论

选定记录波长 $\lambda_w^* = 632.8 \text{ nm}$ 、读出中心波长为 $\lambda_r^* = 1550 \text{ nm}$ 。从图 3、(8a)式、(8b)式分析得光束

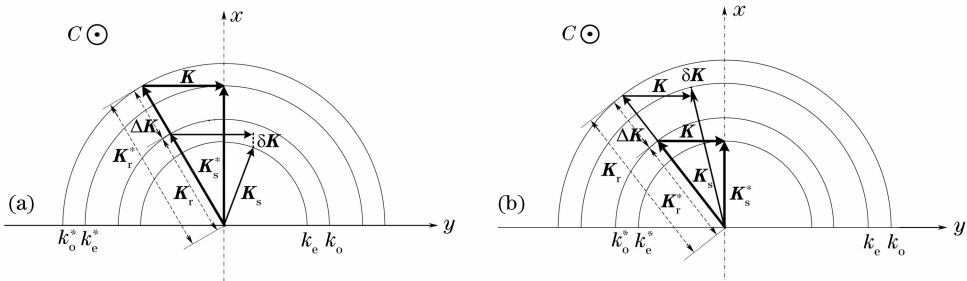


图 6 在满足和非满足布拉格相位匹配条件时的布拉格相位匹配比较图

Fig. 6 Comparison of Bragg phase mismatching with and without the Bragg phase matching

读出角 $\theta_r^* = 15.30^\circ$,且此时相应的衍射角为 $\theta_s = 0$ 。依据相位匹配条件,可得记录角 $\theta_w^* = 3.13^\circ$ (所有角度均是晶体内的角度)。

在光折变 LiNbO_3 晶体中,以上述参数 λ_w^* 和 θ_w^* 记录一个光栅,波数为 k^* 。为防止读出时对光栅的擦除,可以采用热固定方案对此记录的光栅进行固定。读出时,用一束多波长光束去读此光栅,读出角为 $\theta_r^* = 15.30^\circ$ (相应地晶体外读出角为 $\theta_R = 36.02^\circ$)。在多光束读出光中,波长为 $\lambda_r^* = 1550 \text{ nm}$ 的读出是满足布拉格条件的,衍射最大。而其他波长读出光束则偏离布拉格条件,这种偏离造成失谐量 $\Delta K = K_r - K_r^*$,进一步导致偏离的布拉格波矢 δK 。

图 6 给出了在满足和不满足布拉格条件两种情况下的波矢比较图。图 6(a)对应于 $\lambda_r > \lambda_r^*$ 的情况,相应地 $K_r^* = K_r + \Delta K$;图 6(b)对应于 $\lambda_r < \lambda_r^*$ 的情况,相应地 $K_r^* = K_r - \Delta K$ 。其中 k_o^*, k_e^*, K_r^* 和 K_s^* 分别是工作波长为 λ_r^* 时对应的 o 偏振和 e 偏振波矢面以及读出光、衍射光波矢。 k_o, k_e, K_r 和 K_s 分别是工作波长为 λ_r 时对应的 o 偏振和 e 偏振波矢面以及读出光和衍射光波矢。

从图 6 求得 δk

$$\delta k = k_r \cos \theta_r^* - k_s \cos \theta_s = k_o (n_o \cos \theta_r^* - n_e \cos \theta_s), \quad (9)$$

在失谐量 δk 时,各向异性布拉格衍射的衍射效率为

$$\eta = \frac{\sin^2(\nu^2 + \xi^2)^{1/2}}{(1 + \xi^2/\nu^2)}, \quad (10)$$

且

$$\nu = \frac{\pi L \Delta n}{\lambda_r (\cos \theta_r \cos \theta_s)^{1/2}}, \quad \xi = L \delta k / 2, \quad (11)$$

式中 L 为晶体厚度, Δn 为由于光折变效应产生的折射率调制量。

由 (8a)式、(10)式、(11)式,可得衍射效率 η 关于读出波长 λ_r 和衍射角 θ_w 的关系图,如图 7 所示。

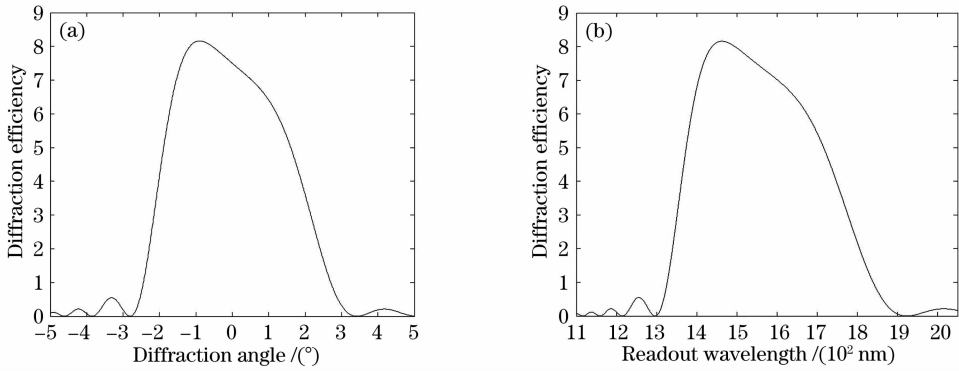


图 7 (a)衍射效率关于衍射角的变化曲线图,(b)衍射效率关于读出波长的变化曲线图

Fig. 7 Variation curve of diffraction efficiency as a function of diffraction angle (a) and readout wavelength (b)

从图 7 可以看到衍射效率在波长范围 1400 nm 至 1650 nm 内近似均匀,相应的衍射角变化范围 θ_s 为 $-1.5^\circ \sim +1^\circ$ (在晶体内)。

假设光束发散角 $\delta\theta$ 为 10^{-3} rad (晶体外),可分离的光点也就是实现 WDM 可能信道数目,即

$$N = \frac{\Delta\theta_s}{\delta\theta} = 93, \quad (12)$$

因此,可以通过选择较小的发散角来提高复用信道数。

5 结 论

本文提出了一种新颖的单光栅实现波分复用的方案。此方案通过记录在光折变 LiNbO₃ 晶体中的单光栅即可实现波长解复用,可能的信道波长范围为 1400 nm 至 1650 nm,信道数达 93 个。这种方案的明显优势在于只需记录一个光栅,所以光栅记录比较简单。另外,读出和衍射光的偏振方向互相垂直,只需放置一个偏振片就可以把透射和衍射光分离,不需特殊切割晶体。

参 考 文 献

- 1 C. A. Brackett. Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications[J]. *IEEE J. Select Areas Commun.*, 1990, **8**(6): 948~964
- 2 J. W. An, N. Kim, K. W. Lee. Volume holographic wavelength demultiplexer based on rotation multiplexing in the 90° geometry[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **197**: 247~254
- 3 S. Breer, K. Buse. Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate[J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **66**: 339~345
- 4 P. Boffi, M. Chiara Ubaldi, D. Piccinin *et al.*. 1550-nm volume holography for optical communication devices [J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(10): 1355~1357
- 5 Ph. Dittrich, G. Montemezzani, P. Günter. Tunable optical filter for wavelength division multiplexing using dynamic interband photorefractive gratings[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **214**: 363~370
- 6 Zhu Rong, Liu De'an, Liu Liren *et al.*. Characteristics of grating erasure in LiNbO₃:Fe[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(2): 185~189
朱 荣,刘德安,刘立人等. LiNbO₃:Fe 晶体光栅擦除特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 185~189
- 7 X. N. Yan, H. M. Jing. Theory of variable-angle switch by anisotropic diffraction in photorefractive LiNbO₃ crystal [J]. *Optik*, 2004, **115**(10): 455~458
- 8 A. Yarive, P. Yeh. *Optical Waves in Crystals: Propagation and Control of Laser Radiation* [M]. J. Wiley, 1984