

文章编号: 0258-7025(2006)03-0361-05

双掺杂 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$ 晶体局域光折变体全息光栅形成及衍射特性

王 欣, 闫爱民, 刘德安, 胡志娟, 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

摘要 将带运输模型与二维耦合波理论相结合,研究了双掺杂 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$ 晶体中由两束有限宽度平面波干涉产生的局域光折变体全息的动力学机制及其衍射特性。采用三步法联立求解了双中心带运输物质波方程和二维耦合波方程。数值计算结果表明,局域光折变体全息光栅的空间电荷场在空间上呈不均匀分布。当光栅区域较小时空间电荷场较强,随着光栅区域的增大,空间电荷场急剧下降,并降低一个数量级。此外,在接近光束入射边界的区域,空间电荷场时空变化规律与一维无限大光折变体全息光栅的结果相似,随着光栅区域的扩大,边界效应对空间电荷场的影响越显著。研究还发现,局域光折变体全息光栅的衍射效率随光栅厚度的增加而增加。理论结果对于由局域光折变体全息光栅形成的光学器件与系统的设计和应用具有重要的参考意义。

关键词 衍射与光栅;局域光折变体全息光栅;带运输模型;二维耦合波理论

中图分类号 O 438 **文献标识码** A

Formation and Diffraction Characteristics of Local Volume Photorefractive Holographic Gratings in Two Doped $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$ Crystals

WANG Xin, YAN Ai-min, LIU De-an, HU Zhi-juan, LIU Li-ren

(*Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

Abstract Both dynamic mechanisms and diffraction characteristics of the local volume photorefractive holographic gratings recorded by two finite bounded plane waves in doubly doped $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$ crystals are investigated, by taking into account both the band transport model and two-dimensional coupled-wave theory. The three step method is used to solve both the band transport equation and the two-dimensional coupling equation. The numerical calculations show that the spatial distribution of the space-charge field is non-homogeneous in the local volume photorefractive holographic gratings. The space-charge field is much stronger when the grating region is smaller. As the grating region widening, the space-charge field decreases by an order of magnitude. Besides, the time-space variation of the space-charge field is the same as that of one dimension infinite photorefractive holographic gratings in the place closer to the incident boundary. But the influence of the special local effect on the space-charge field is very important as the grating region extends. It is also shown that the diffraction efficiency increases with the increase of the grating length of the local volume photorefractive holographic gratings. The theoretical results provide valuable insight to the design and application of these gratings and the finite boundary photorefractive holographic optical elements.

Key words diffraction and gratings; local volume photorefractive holographic gratings; band transport model; two-dimensional coupled-wave theory

1 引 言

基于晶体光折变效应形成的体全息光栅由于记

录全息的可选择性、可擦除性、灵敏的角度和波长选择性等优点,可以用于制作波分复用器件、光耦合器

收稿日期:2005-07-07;收到修改稿日期:2005-10-08

基金项目:国家自然科学基金(60177106)和国家科学技术部(2002CCA03500)资助项目。

作者简介:王 欣(1978—),女,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事局域光折变体光栅光折变特性方面的研究。E-mail:wangxin@mail.siom.ac.cn 或 wangxin207@sohu.com

件和波长转换器件等,从而在光通信、集成光学以及光存储等领域有着广泛的应用^[1~5]。近年来,随着光通信和全光网络的迅速发展,光学器件与系统的微型化和集成化已经成为一种发展趋势,在一块晶体中空间选择性地记录边界清晰的局域体全息构成三维集成系统,可以实现单块晶体的光学集成。局域光折变体全息光栅在三维微结构光学集成方面发挥独特的优势^[6],关于它的光折变形成机制的研究已成为当前重要的研究课题。

对于光折变晶体中体全息光栅光折变机制的研究,Kukhtarev带输运模型是被广泛采用的理论模型^[7]。基于该理论模型和Buse等^[8]提出的双中心、双色光非挥发性全息存储技术,Ren等^[9]将两中心物质波方程和双光束耦合波方程联立,采用三步法进行数值求解,建立了描述双掺杂LiNbO₃晶体光折变过程的动力学模型。但该模型描述对象是一维无限大光折变体全息光栅,即认为记录光束宽度是无限大的,并没有涉及有限边界光折变体全息光栅的形成和衍射问题。目前,国际上有关局域体光栅的研究主要是采用二维和三维耦合波理论研究静态局域体全息光栅的衍射问题^[10~13],即认为局域体全息光栅的光栅调制是均匀的,而没有考虑局域体全息光栅的光折变过程。实际上,在光折变晶体内记录的体全息光栅是一种动态非均匀体相位光栅,研究其光折变过程需要同时考虑光对物质的作用和物质对光的作用。

本文将带输运模型与二维耦合波理论相结合,采用三步法联立求解二维双中心物质波方程和二维双光束耦合波方程,研究双掺杂LiNbO₃晶体中由两束有限宽度平面波干涉产生的局域光折变体全息光栅的光折变动力学过程及其衍射特性。

2 理论模型

2.1 二维局域光折变体全息光栅的记录结构

图1为两束有限宽度平面波 E_{10} 和 E_{20} 干涉产生的局域光折变体全息光栅记录结构,其中 z 轴沿晶体表面方向, x 轴沿晶体厚度方向;光轴 \hat{c} 沿 z 轴, x' 和 z' 分别沿两光束边界方向。两束记录光均为寻常光,其光束宽度分别为 $w_1 = w_2 = w$, θ 为两光束在晶体内的入射角;两记录光波振幅为

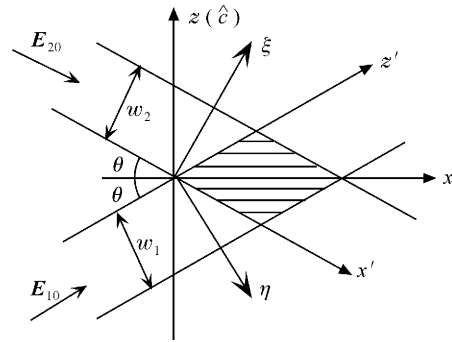


图1 局域光折变体全息光栅记录结构

Fig. 1 Geometry for a local volume holographic grating

$$E_1(\mathbf{r}) = A_1(x, z) \exp(-i\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{r}),$$

$$E_2(\mathbf{r}) = A_2(x, z) \exp(-i\mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{r}), \quad (1)$$

式中 A_1 和 A_2 分别为光束 E_{10} 和 E_{20} 的电场复振幅, \mathbf{K}_1 和 \mathbf{K}_2 分别为其光波矢量。根据光折变效应,有限宽度相干平面波可在晶体内建立起具有有限边界的局域光折变体全息光栅。其光栅波矢为 $\mathbf{K}_g = \mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2$,方向沿 z 轴,大小为 $K_g = 2k_0 n_0 \sin\theta$,其中 k_0 为记录光在真空中的波矢大小, n_0 为记录光相对应的晶体折射率。

2.2 双掺杂LiNbO₃晶体的带输运方程

双掺杂LiNbO₃晶体中,对于有限宽度光束形成的局域光折变体全息光栅,直接求解多维含时偏微分方程组即带输运方程是困难的。为了简化计算,取以下近似条件:首先,认为导带中的电子扩散主要沿极化方向,忽略其他方向的电子扩散。第二,只考虑纵向光生伏打效应,因此光生伏打电流沿光轴方向。第三,无外加电场,晶体内电场只含有空间电荷场的贡献。第四,导带中电子寿命很短。采用一次谐波近似,将每一个与光强有关的物理量都近似为其直流分量和基频分量之和,得到双掺杂LiNbO₃晶体物质波方程:

零阶方程

$$\frac{\partial N_{D0}^-}{\partial t} = -g_D N_{D0}^- + \gamma_D N_{e0} (N_D - N_{D0}^-), \quad (2a)$$

$$\frac{\partial N_{S0}^-}{\partial t} = -g_S N_{S0}^- + \gamma_S N_{e0} (N_S - N_{S0}^-), \quad (2b)$$

$$N_{e0} = \frac{g_D N_{D0}^- + g_S N_{S0}^-}{\gamma_D (N_D - N_{D0}^-) + \gamma_S (N_S - N_{S0}^-)}, \quad (2c)$$

一阶方程

$$\frac{\partial N_{D1}^-}{\partial t} = -g_D N_{D1}^- - S_{D,L} m I_{L0} N_{D0}^- + \gamma_D N_{e1} (N_D - N_{D0}^-) - \gamma_D N_{e0} N_{D1}^-, \quad (3a)$$

$$\frac{\partial N_{S1}^-}{\partial t} = -g_S N_{S1}^- - S_{S,L} m I_{L0} N_{S0}^- + \gamma_S N_{e1} (N_S - N_{S0}^-) - \gamma_S N_{e0} N_{S1}^-, \quad (3b)$$

$$N_{e1} = \frac{\left\{ \begin{aligned} &(g_D + \gamma_D N_{e0}) N_{D1}^- + (g_S + \gamma_S N_{e0}) N_{S1}^- - \frac{e\mu N_{e0}}{\epsilon \epsilon_0} (N_{D1}^- + N_{S1}^-) - \\ &\frac{ik_g}{e} [\kappa_D N_{D1}^- + \kappa_S N_{S1}^- + (\kappa_{D,L} N_{D0}^- + \kappa_{S,L} N_{S0}^-) m I_{L0}] + (S_{D,L} N_{D0}^- + S_{S,L} N_{S0}^-) m I_{L0} \end{aligned} \right\}}{\gamma_D (N_D - N_{D0}^-) + \gamma_S (N_S - N_{S0}^-) + \frac{e\mu N_{e0}}{\epsilon \epsilon_0} + \frac{K_B T \mu K_g^2}{e}}, \quad (3c)$$

其中角标 0 和 1 分别表示相关物理量的直流分量和基频分量,角标 D 和 S 分别表示深中心和浅中心,角标 H 和 L 分别表示敏化光(高频)和记录光(低频);变量 $S, \gamma, I, \kappa, N, N^-$ 和 N_e 分别表示光激发常数、陷阱的电子俘获系数、光强、体光生伏特系数、陷阱浓度、陷阱中的电子浓度和导带中的电子浓度; e, μ, ϵ, T, K_B 分别为电子电荷、电子迁移率、介电常数、温度和玻尔兹曼常数。 $g_D = S_{D,L} I_{L0} + S_{D,H} I_H, g_S = S_{S,L} I_{L0} + S_{S,H} I_H, \kappa_D = \kappa_{D,L} I_{L0} + \kappa_{D,H} I_H$ 和 $\kappa_S = \kappa_{S,L} I_{L0} + \kappa_{S,H} I_H, I_{L0}(z, x) = I_{L10}(z, x) + I_{L20}(z, x), m(z, x) = 2A_1 \cdot A_2^* / (I_{L1} + I_{L2}), I_{L1} = |A_1|^2$ 和 $I_{L2} = |A_2|^2$ 分别为两记录光光强。用无限宽的紫外敏化光沿 x 轴方向照射晶体,即 $I_H = I_{H0} \exp(-\alpha_{uv} x)$, 其中 α_{uv} 为紫外敏化光在晶体中的吸收系数。

空间电荷场可以表示为

$$\mathbf{E}_{sc} = -\frac{ie}{\epsilon \mathbf{K}_g} (N_{D1}^- + N_{S1}^- + N_{e1}), \quad (4)$$

根据线性电光效应,折射率调制深度 n_1 可表示为

$$n_1 \exp(i\varphi_E) = -n_0^3 \gamma_{13} \mathbf{E}_{sc} / 2. \quad (5)$$

φ_E 表示空间电荷场相位角。

2.3 二维双光束耦合波方程

忽略红光吸收,由波动方程可得到二维双光束耦合波方程

$$\begin{cases} \cos\theta \frac{\partial A_1}{\partial x} + \sin\theta \frac{\partial A_1}{\partial z} + i \frac{n_1 \pi}{\lambda} A_2 \exp(i\varphi_E) = 0, \\ \cos\theta \frac{\partial A_2}{\partial x} - \sin\theta \frac{\partial A_2}{\partial z} + i \frac{n_1 \pi}{\lambda} A_1 \exp(-i\varphi_E) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

式中 λ 为记录光在真空中的波长。为简化计算,建立新的坐标系,对方程(6)进行坐标变换。如图 1 所示, ξ 轴, η 轴分别沿 \mathbf{K}_2 和 \mathbf{K}_1 垂直方向,其中 $\xi = x \sin\theta + z \cos\theta, \eta = x \sin\theta - z \cos\theta$ 。坐标变换后的双光束耦合波方程为

$$\begin{cases} \sin 2\theta \frac{\partial A_1}{\partial \xi} + i \frac{n_1 \pi}{\lambda} A_2 \exp(i\varphi_E) = 0, \\ \sin 2\theta \frac{\partial A_2}{\partial \eta} + i \frac{n_1 \pi}{\lambda} A_1 \exp(-i\varphi_E) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

定义局域光折变体光栅的衍射效率为 ξ 方向的衍射光能量与 η 方向读出光能量和 ξ 方向衍射光能量总和的比值,即

$$DE = \frac{P_{out}^S}{P_{out}^R + P_{out}^S}, \quad (8)$$

$$\text{其中, } P_{out}^S = \int_0^w |A_2(\xi, w)|^2 d\xi \csc 2\theta,$$

$$P_{out}^R = \int_0^w |A_1(w, \eta)|^2 d\eta \csc 2\theta.$$

根据以上分析,局域光折变体全息光栅的动态光折变过程由一组含有时空变量的偏微分方程组来描述,需要在时间和空间上联立求解。将局域光折变体全息光栅区域分成网格,采用三步法进行数值计算:首先,利用给定的初始光强条件,数值求解第一时间薄层的物质波方程(2)~(4),得到空间电荷场和折射率调制振幅;第二,将折射率调制振幅代入到二维双光束耦合波方程(7),并用二阶龙格库塔法对其进行求解,得到光强和衍射能量;第三,将光强作为初始条件求解下一时间薄层的物质波方程。依此类推,最终得到整个时间阶段局域光折变体光栅区域内空间电荷场和衍射效率的时空分布规律。

3 数值计算结果与讨论

以下讨论采用的边界条件分别为:记录阶段 $A_1(0, \eta) = A_{10}, A_2(\xi, 0) = A_{20}$, 假定两记录光初始光强相等(即 $A_{10} = A_{20}$);单光束读出阶段 $A_1(0, \eta) = A_{10}, A_2(\xi, 0) = 0$ 。两平面波光束宽度均为 2.5 mm,记录光在晶体外的入射角为 30°。记录阶段时间为 0~200 min,读出阶段为 200~350 min。记录红光总光强为 2000 W/m²,紫外敏化光强为 200 W/m²。其他相关参量取值同文献[9]。

图 2(a)和(b)显示局域光折变体全息光栅区域内空间电荷场呈现不均匀分布。当光栅区域较小时,空间电荷场较强,随着光栅区域的扩大,空间电荷场迅速降低一个数量级,随后其值并不随光栅区域的扩大而变化。可见对于局域光折变体全息光

栅,空间上的边界效应对空间电荷场影响较大。比较图 2(a)和(b)可知,记录阶段空间电荷场较强,固

定阶段较弱。这表明空间电荷场在固定阶段有一部分被擦除。

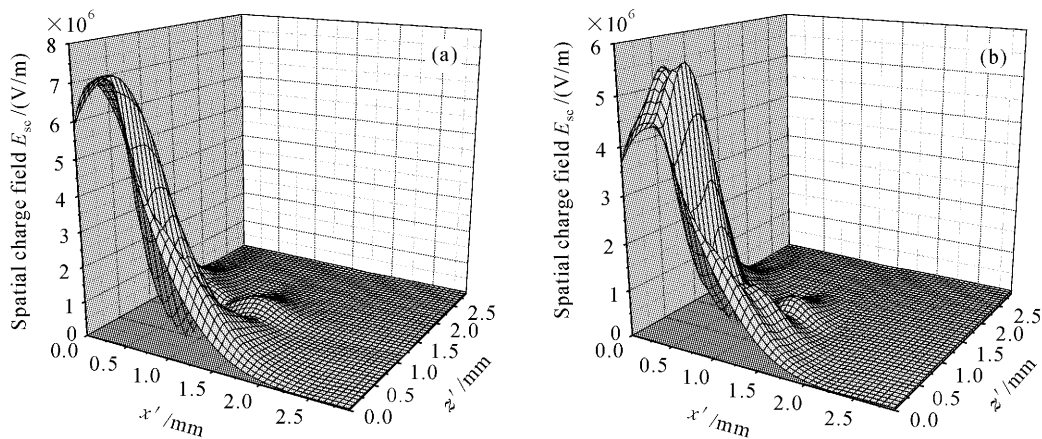


图 2 空间电荷场的空间分布

(a) 记录结束时刻; (b) 固定结束时刻

Fig. 2 Spatial variation of space charge field

(a) at the end of recording; (b) at the end of fixing

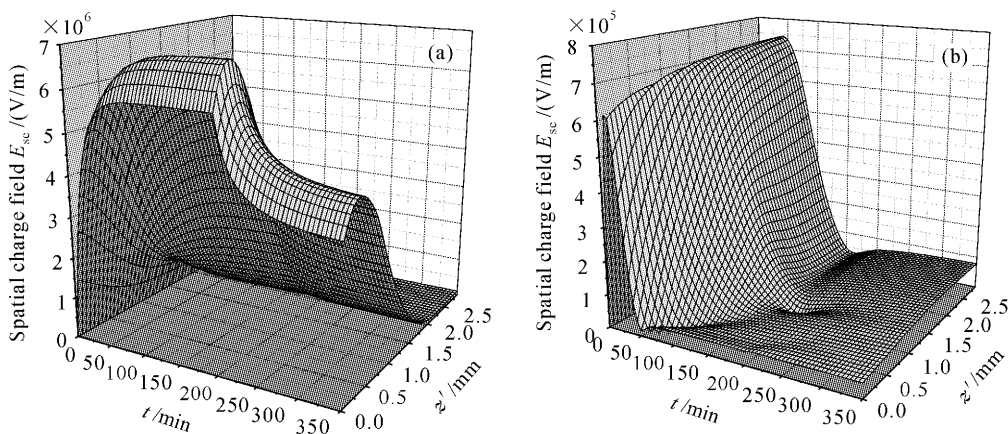


图 3 光栅边界上空间电荷场的时空分布

(a) 光束 E_{20} 入射边界; (b) 光束 E_{20} 出射边界

Fig. 3 Spatial time variation of spatial charge field at the boundary

(a) at the incident boundary of E_{20} ; (b) at the outside boundary of E_{20}

从图 3(a)可以看出,光束 E_{20} 入射边界上的空间电荷场时空变化趋势与一维无限大光折变体全息光栅^[9]的完全一致,这是由于此区域光栅只在一维 z' 方向上有厚度,这相当于一维无限大光折变体全息光栅。图 3(b)表明,空间电荷场在光束出射边界上的变化与入射边界上明显不同,此时空间电荷场在记录初始阶段出现振荡,固定阶段空间电荷场并没有明显地被擦除。这种现象说明随着光栅厚度增大,局域边界效应对光折变体全息光栅形成有着重要的影响。

图 4(a)表明在入射边界上(即 $\eta = 0$ mm)局域

光折变体全息光栅的衍射效率为 0,这是由于边界上光束 E_{20} 的振幅为 0。随着 η 的增大,衍射效率逐渐增大。当 η 值较小时(小于 0.5 mm),衍射效率随时间变化趋势与一维无限大光折变体光栅衍射效率一致,但随 η 的增大衍射效率在记录初始阶段出现振荡。这是由于光栅厚度较大时,空间边界效应对局域光折变体光栅影响较大。图 4(b)显示在记录和固定结束时刻局域光折变体全息光栅的衍射效率都随着光栅厚度的增大而增大,达到一定厚度后变化趋势减缓。该结果符合局域体光栅衍射效率的贝塞耳函数规律,与文献[10]结果一致。由此可见增

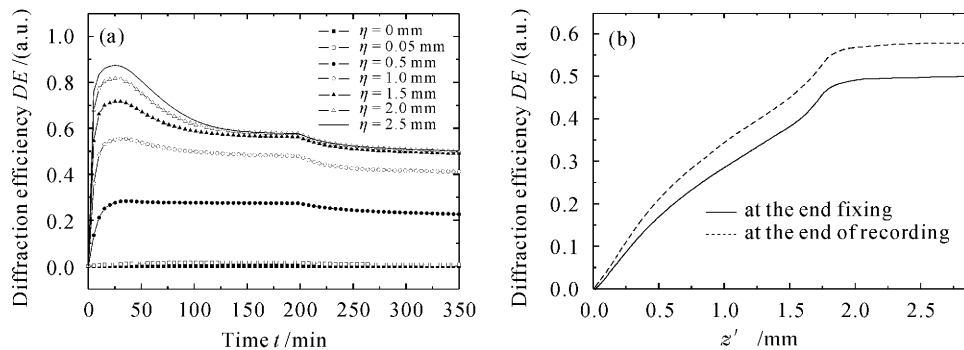


图 4 (a) 不同光栅厚度衍射效率随时间的变化曲线; (b) 衍射效率随光栅厚度的变化曲线

Fig. 4 (a) Diffraction efficiency variation for different propagation distance η ;

(b) Diffraction efficiency changes with the grating thickness

大光束宽度扩大光栅区域有利于提高局域光折变体全息光栅的衍射效率。

4 结 论

将带运输模型与二维耦合波理论相结合, 采用三步法联立求解二维双中心物质波方程和二维双光束耦合波方程, 研究了双掺杂 LiNbO_3 晶体中由两束有限宽度平面波干涉产生的局域光折变体全息光栅的记录和固定过程, 空间电荷场和衍射效率的时空变化规律。研究发现, 局域光折变体全息光栅的空间电荷场在空间上呈现不均匀分布, 同时, 空间边界效应对空间电荷场以及衍射效率有重要影响, 局域光折变体全息光栅的衍射效率随光栅厚度增加而增加。研究结果对于开展局域光折变体全息光栅纵深研究并拓展其在光学器件与系统中的应用具有重要意义。

参 考 文 献

- Liren Liu, Bo Liu, Xiaona Yan *et al.*. Photorefractive miniaturized integration of optical three-dimensional systems [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 1999, **1**(2):220~224
- S. Breer, H. Vogt, I. Nee *et al.*. Low-crosstalk WDM by Bragg diffraction from thermally fixed reflection holograms in lithium niobate [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(25):2419~2421
- Xu Xinguang, Xu Guibao, Hu Dawei *et al.*. Photorefractive holographic storage properties in Ce:Fe-doped LiNbO_3 crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7):947~952
许心光, 许贵宝, 胡大伟 等. 掺 Ce, Fe 系列 LiNbO_3 晶体光折变效应光存储特性[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7):947~952
- Dong Qianmin, Liu Liren, Liu De'an *et al.*. Optimal dopant composition ratio during nonvolatile holographic recording in $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$ crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):248~251
董前民, 刘立人, 刘德安 等. $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}:\text{Ce}$ 非挥发全息记录掺杂组份比的优化[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):248~251
- Chai Zhifang, Liu De'an, Dai Cuixia *et al.*. Study of UV recording in congruent Ce:Mn: LiNbO_3 [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1132~1136
柴志方, 刘德安, 戴翠霞 等. Ce:Mn: LiNbO_3 晶体紫外记录研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8):1132~1136
- S. Breer, K. Buse. Wavelength demultiplexing with volume phase holograms in photorefractive lithium niobate [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **66**(3):339~345
- N. V. Kukhtarev, V. B. Markov, S. G. Odulov *et al.*. Holographic storage in electrooptic crystals I. Steady state [J]. *Ferroelectrics*, 1979, **22**(3-4):949~960
- K. Buse, A. Adibi, D. Psaltis. Non-volatile holographic storage in doubly doped lithium niobate crystals [J]. *Nature*, 1998, **393**(6685):665~668
- Liyong Ren, Liren Liu, De'an Liu *et al.*. Recording and fixing dynamics of nonvolatile photorefractive holograms in $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}:\text{Mn}$ crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(10):2162~2173
- R. P. Kenan. Theory of crossed-beam diffraction gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-14**(12):924~930
- G. Notni, R. Kowarschik. Diffraction analysis of three-dimensional volume gratings with arbitrary boundaries [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1989, **6**(11):1682~1691
- Yan Aimin, Liu Liren, Liu De'an *et al.*. Diffraction characteristics of local volume holographic gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9):1203~1208
闫爱民, 刘立人, 刘德安 等. 局域体全息光栅的衍射特性[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9):1203~1208
- Wang Bo, Tao Shiquan, Chen Jiabi. Re-investigation on the solution to two-dimensional coupled wave equations for volume holographic gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):21~25
王 博, 陶世荃, 陈家璧. 体光栅二维耦合波方程解析解的再探讨[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):21~25