

文章编号: 0253-2239(2007)03-0395-5

90°全息记录衍射效率分析与提高*

周 煜 刘立人 闫爱民 刘德安 栾 竹

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学研究室, 上海 201800)

摘要: 对光折变全息记录特别是双中心全息记录中 90°记录结构下较低的衍射效率进行了研究,采用局域衍射理论对 90°记录结构的衍射进行了分析,表明在同样的折射率变化和 2 mm 的光束宽度的情况下,只有当折射率光栅振幅大于 10^{-4} 时,90°记录结构衍射效率才能够与小角度透射记录结构的衍射效率大致相当。针对环境干扰导致的干涉条纹振动影响光栅记录,提出了有效调制度概念,根据分析 90°记录结构的干涉条纹间距很小,容易受外界环境干扰而导致低的折射率变化率,因此应采用主动条纹锁定系统。此外在双中心全息记录中,微观光学参量的优化对衍射效率影响也很重要。

关键词: 光折变光学; 衍射效率; 局域衍射; 双中心全息记录

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

Analyses and Enhancement of Diffraction Efficiency in 90° Holographic Recording Geometry

Zhou Yu Liu Liren Yan Aimin Liu Dean Luan Zhu

(Laboratory for Information Optic, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract: The relatively low diffraction efficiency of photorefractive holographic recording, especially that of the two-center holographic recording with 90° geometry, is studied, based on the theory of local diffraction. It shows that the diffraction efficiency in 90° geometry can be comparable with that in transmission geometry only when the amplitude of refractive index gratings is more than 10^{-4} with the same refractive index change and beam width of 2 mm. According to the effects of fringe vibration caused by environmental perturbation on holographic recording, a concept of effective modulation is proposed. Narrow grating space in 90° recording geometry makes it more sensitive to ambient disturbs and leads to low refractive index change. To obtain high diffraction efficiency in experiments with 90° geometry, an active fringe stabilization system is necessary. Furthermore, in two-center holographic recording, the effects of microcosmic optical parameters on diffraction efficiency are also important.

Key words: photorefractive optics; diffraction efficiency; local diffraction; two-center holographic recording

1 引 言

90°全息记录结构在大尺寸全息记录以及压制全息噪声等方面具有特殊的优势^[1~3],但是其主要缺陷在于较低的衍射效率和灵敏度^[4]。以前的研究认为单中心全息记录中 90°记录结构较低的衍射效率主要来自于较大的光栅波矢、低的有效电光系数

和低的平均调制度,其中较大的光栅波矢将导致 2 倍的空间电荷场损失^[4]。当同样采用寻常光记录和小体积记录晶体时,在 90°记录结构与透射记录结构的比较中可以忽略有效电光系数和平均调制度对空间电荷场的影响,较大的光栅波矢将是降低衍射效率的主要因素。在双中心全息记录中,从理论上

* 科技部重点专项(2002CCA03500)资助课题。

作者简介: 周 煜(1976—),湖北荆州人,助理研究员,主要从事光折变光学、物理光学、光通信方面的研究。

E-mail: sunny@mail.siom.ac.cn

导师简介: 刘立人(1942—),男,上海人,研究员,博士生导师,主要从事光折变光学、晶体光学和星际激光通信的研究。

E-mail: lirenliu@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2006-05-10; 收到修改稿日期: 2006-06-21

看较大的光栅波矢导致的空间电荷场下降将不超过 10%，这是因为在双中心全息记录中占主导地位的光生伏特场远低于饱和空间电荷场，因此反比于光栅波矢的饱和空间电荷场对稳态空间电荷场影响较小^[5]。由于光折变效应主要利用线性电光效应，因此折射率变化量正比于空间电荷场；而根据科杰尼克(Kogelnik)的衍射理论^[6]，衍射效率为包含折射率变化量的宗量的正弦平方函数，因此理论上在同样采用寻常光偏振态记录的情况下，90°记录结构与透射记录结构的衍射效率相比下降最大不超过 20%。但是在实验中，寻常光记录的透射结构下双中心全息记录的光栅衍射效率可达到 80%以上，而同样采用寻常光记录的 90°记录结构下双中心全息记录的光栅衍射效率往往不超过 10%，远低于理论预言的 65%的衍射效率。由于理论与实验结果相差较大，因此采用通常分析小角度透射结构的科杰尼克衍射理论分析 90°记录结构的衍射效率存在缺陷，同时试验上也可能存在对大角度记录情况环境干扰更为严重的问题。本文将从记录光栅的衍射、微观光学参量对双中心全息记录的影响、实验环境这三个方面探讨全息记录特别是双中心全息记录中 90°记录结构衍射效率较低的原因，并给出改善这三个方面的建议和需要达到的阈值。

2 理论分析

本文分析中将不再考虑理论上光栅波矢大小对空间电荷场生成的影响，文献[4]中的分析结果可作

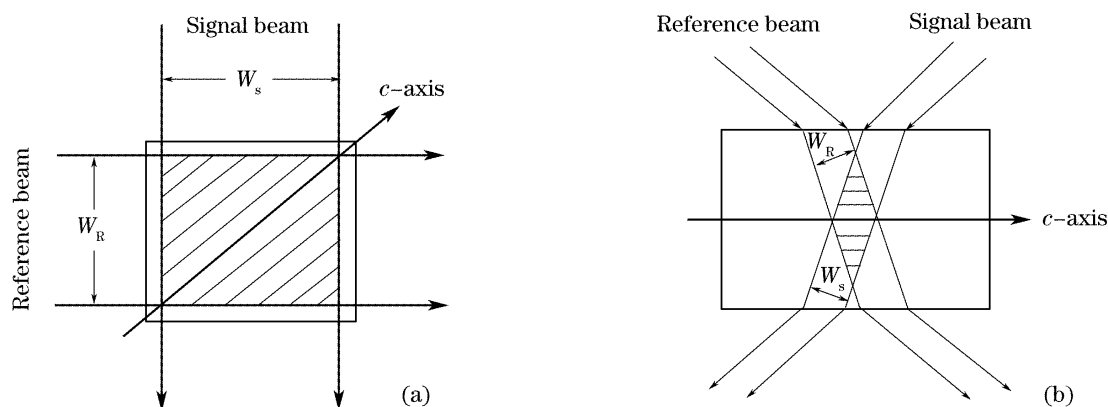


图 1 有限尺寸晶体中生成的光栅结构示意图。(a) 90°结构，(b)透射结构

Fig. 1 Schematics of grating with finite size in crystals. (a) 90° geometry, (b) transmission geometry

研究有限体积体光栅衍射的理论称为交叉光束衍射光栅理论，或称为局域衍射理论，根据分析其衍射特性介于科杰尼克耦合波理论中透射式光栅与反射式光栅的衍射特性之间^[8~12]。当一束光以原记录光入射角入射有限体积体光栅时，其衍射效率为^[10]：

为并列因素在对双中心全息记录衍射效率的分析中考虑。所有分析以(Fe, Mn):LiNbO₃晶体双中心全息记录为例，深、浅中心浓度分别为 $3.8 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 和 $2.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ，记录波长 633 nm，敏化光波长 365 nm，分析基于文献[7]中的理论模型与参量。

2.1 光栅衍射效率分析与改善

通常在光折变全息记录中对光栅衍射效率的分析都采用科杰克尼的耦合波理论^[6]。这个理论结果形式简单，使用方便，但是其分析采用了一些近似，其中之一是假定光栅的边界无限大，因此在耦合波分析中可以不用考虑除入射面和出射面外的其他边界的边界效应，光栅衍射效率为

$$\eta_k = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda_0 \cos \theta} \right), \quad (1)$$

其中 λ_0 为记录光在真空中的波长； θ 为干涉光束在晶体中的半夹角， d 为晶体厚度， Δn 为折射率的变化量，与空间电荷场 E_{sc} 的关系为

$$\Delta n = \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{\text{eff}} E_{sc}, \quad (2)$$

其中 n_0 为寻常光折射率， γ_{eff} 为有效电光系数。

但是在实际光栅衍射中，光栅是有限的，特别是厚光栅大角度记录时边界效应将非常明显，而 90°记录结构下生成的光栅的衍射必然是有限体积光栅的局域衍射。厚记录介质中在透射结构与 90°结构下生成的光栅如图 1 所示。

$$\eta(\omega_0) = 1 - J_0^2(\omega_0) - J_1^2(\omega_0), \quad (3)$$

其中 J 为贝塞尔函数， ω_0 为入射光束宽度的函数。当参考入射光的宽度 W_R 和信号光的宽度 W_s 远大于记录光波长时，入射光波面可看作为准平面波，忽略边缘效应， ω_0 可简写为

$$\omega_0 = \frac{\pi \Delta n}{\lambda_0 \cos \theta} \frac{\sqrt{W_R W_S}}{\sin \theta}, \quad (4)$$

当 Δn 较小导致 ω_0 较小时, (3) 式可简化为

$$\eta \approx (\omega_0/2)^2 = [\pi \Delta n d_{\text{eff}} / (\lambda_0 \cos \theta)]^2,$$

其中有效晶体厚度 $d_{\text{eff}} = (W_R W_S)^{1/2} / (2 \sin \theta)$; 而科杰尼克理论的衍射效率可简化为

$$\eta \approx [\pi \Delta n d / (\lambda_0 \cos \theta)]^2,$$

因此局域光栅的衍射类似于科杰尼克衍射理论。当 ω_0 较大时局域衍射效率最终趋向于 1; 而科杰尼克衍射将随 Δn 增大呈正弦平方振荡, 因此局域衍射逐渐偏离科杰尼克衍射理论。而同等折射率变化量下 θ 越大, ω_0 就越小, 衍射效率也越低。

在假定透射与 90° 全息记录结构生成的折射率变化量 Δn 相同且均匀分布的情况下, 根据 (3) 式, 图 2 模拟了不同记录夹角情况下局域光栅衍射随 Δn 的变化关系, 其中夹角为记录光在晶体内部的全角, 记录光束宽度都为 2 mm, 记录波长 633 nm。由图 2 可见, 当 Δn 较小时两种记录结构的衍射效率都随 Δn 上升很快; 当 Δn 较大时两种记录结构的衍射效率都随 Δn 缓慢上升, 并且有台阶效应, 衍射效率最终缓慢地无限接近 1。同时可以看出当 Δn 较小时, 透射记录结构的衍射效率随 Δn 上升比 90° 记录结构要快得多, 因此当 Δn 较小时记录夹角对衍射效率影响很大。图 3 模拟了 10° 内夹角记录结构与 90° 记录结构的衍射效率之比随 Δn 的变化, 可见即使在同等 Δn 情况下, 当 Δn 较小时 90° 记录结构衍射效率将远低于小角度透射记录结构, 只有当 $\Delta n > 1 \times 10^{-4}$ 时, 两种记录结构的衍射效率逐渐接近。

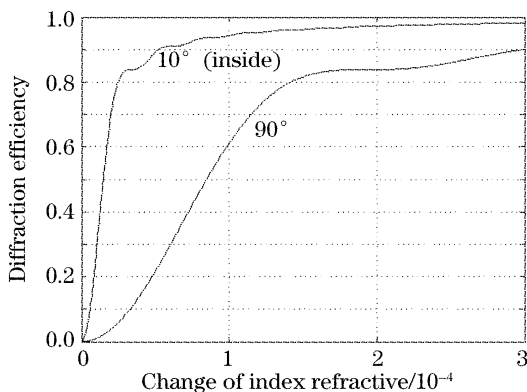


图 2 局域光栅衍射效率随折射率变化量的变化

Fig. 2 Diffraction efficiency of finite size volume grating as a function of the refractive index change in different inside angles

设两记录光光束宽度均为 W , 记录波长为 633 nm, 根据 (3) 式和 (4) 式在 90° 全息记录结构下为实现 60% 以上的衍射效率, 折射率变化量与光束

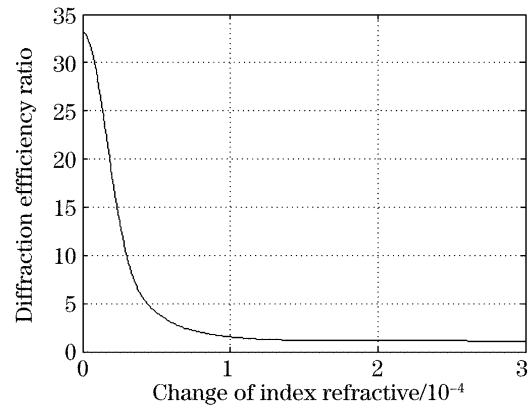


图 3 10° 晶体内夹角记录与 90° 记录衍射效率之比随折射率变化量的变化

Fig. 3 Diffraction efficiency ratio of 10° inside angle to 90° geometry as a function of the refractive index change 宽度之积必需满足

$$\Delta n \cdot W > 2 \times 10^{-7}, \quad (5)$$

2.2 微观光学参量影响与改善

在双中心全息记录中, 掺杂元素, 深、浅中心的掺杂浓度、氧化率以及记录光与敏化光的光强比 $I_{\text{red}}/I_{\text{UV}}$ 都对最终固定空间电荷场强度有较大影响。在选定掺杂元素后, 通常选择在不导致电子隧道效应的前提下掺入最高浓度的浅中心以提高灵敏度和固定空间电荷场, 然后根据浅中心浓度掺入优化的深中心浓度^[7]。为实现固定, 浅中心需要达到 100% 的氧化, 而深中心一部分氧化; $I_{\text{red}}/I_{\text{UV}}$ 将同时影响记录灵敏度和固定空间电荷场。在实际晶体掺杂的情况下, 掺杂浓度难以掌握, 因此氧化率与记录光与敏化光的光强比的选择将是实际可操作的关键, 而优化的氧化率是与优化光强比是互相关联的。图 4 显示了一种极端的情况, 此时深中心氧化率为 0.6, $I_{\text{red}}/I_{\text{UV}}$ 为 2, 40 min 后固定, 固定空间电荷场较低, 因而 Δn 也较低。但是代入 (3) 式后, 10° 晶体

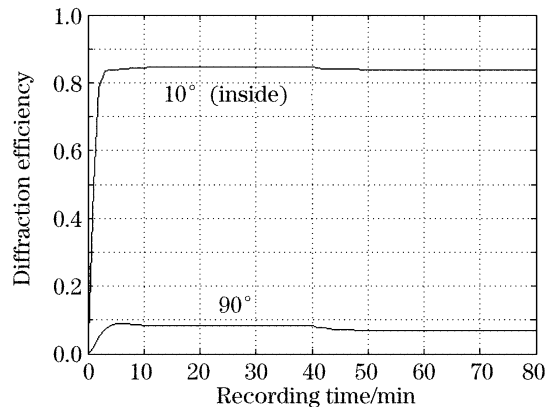


图 4 在一种极端情况下, 衍射效率随时间的演化

Fig. 4 Diffraction efficiency variation with times on an extreme case

内夹角透射记录结构的衍射效率超过了 80%，而 90°记录结构下衍射效率不超过 10%。图 5 给出了 (Fe,Mn):LiNbO₃ 晶体双中心 90°全息记录中,深、浅中心浓度分别为 $3.8 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 和 $2.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$,记录波长 633 nm,敏化光波长 365 nm 的情况下深中心氧化率与 $I_{\text{red}}/I_{\text{UV}}$ 共同对固定折射率变化量的影响。

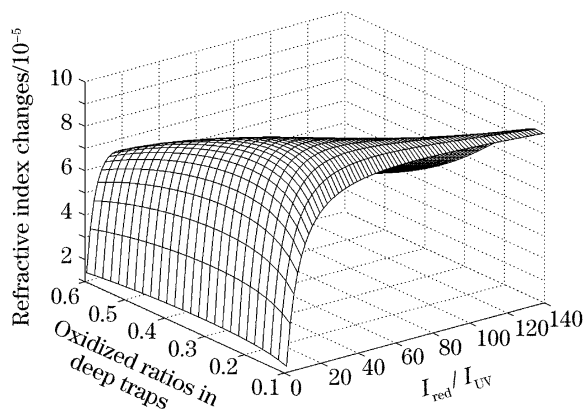


图 5 氧化率与光强比对折射率变化的影响

Fig. 5 Effects of oxidized ratio and intensity ratio on the refractive index changes

由图 5 可知,为实现优化的双中心全息记录,在 (Fe,Mn):LiNbO₃ 晶体 90°记录结构下,优化的深中心氧化率范围为 0.15~0.25,优化的记录光与敏化光的光强比范围为 20~50。同时在普通的双中

心全息记录方式下,在 (Fe,Mn):LiNbO₃ 晶体中很难实现 10^{-4} 以上的折射率变化量。为实现 60% 以上的衍射效率,根据 (5) 式需要增大光束宽度,考虑到由于吸收、增大光束将导致平均调制度下降大约 $1/2^{[4]}$,因此光束宽度应大于 6 mm。尽管根据 (5) 式,理论上增大光束宽度可以在达到同样衍射效率的情况下降低折射率变化量的需求,但是为了保证同样的记录光强必需同时提高入射光功率,因此实际使用时必需根据激光功率选取光束宽度,只要保证光束宽度应大于 6 mm 即可;同时 90°记录结构下光束宽度不可能超过实际采用的记录介质的边界限制。

2.3 实验环境影响与改善

上述分析都没有考虑实验环境的影响,在全息记录实验中,平台机械振动、反射镜由于激光照射导致的热变形、空气湍流、激光器模式跃迁、多纵模等都将导致干涉条纹的位移与振动,从而模糊干涉条纹的边界,导致有效调制度的降低。而不论单中心全息记录还是双中心全息记录,其固定空间电荷场都正比于调制度,因此最终导致折射率变化量的下降。

设记录光调制度为 m ,光强之和为 I ,环境影响导致干涉条纹振动的振幅或多模激光干涉条纹位移为 Δx ,并假定振动频谱为白噪声频谱,此时有效调制度为

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{\int_0^{\Delta x} I(1 + m \cos Kx) dx - \int_0^{\Delta x} I(1 - m \cos Kx) dx}{\int_0^{\Delta x} I(1 + m \cos Kx) dx + \int_0^{\Delta x} I(1 - m \cos Kx) dx} = \frac{\sin K \Delta x}{K \Delta x} m = m \text{sinc}(K \Delta x), \quad (6)$$

其中 I_{\max} 为光强最大处由于干涉条纹振动导致的平均光强, I_{\min} 为光强最小处由于干涉条纹振动导致的平均光强, K 为光栅波矢,与记录光真空波长 λ_0 ,晶体折射率 n ,记录光在晶体半夹角 θ 的关系为

$$K = \frac{4\pi n}{\lambda} \sin \theta. \quad (7)$$

图 6 模拟了采用 633 nm 记录波长时,不同夹角下干涉条纹振动的振幅对有效调制度的影响,对 10°的内夹角全息记录,由于光栅间距较大,因此只要干涉条纹振动的振幅不超过 90 nm,折射率变化量下降不超过 80%;对于 90°全息记录,由于光栅间距约为 0.2 μm ,因此为保持折射率变化量下降不超过 80%,干涉条纹振动的振幅不应超过 12 nm,过大

的振动振幅甚至将导致干涉条纹位移 180°。可见 90°记录结构相比透射记录结构更易受实验环境影响,导致较低的折射率变化,而根据 (3) 式,其衍射效率将更低于透射记录结构。

在 90°记录结构下,保证干涉条纹振动的振幅不超过 12 nm 需要采用主动条纹锁定系统,该系统探测干涉条纹的移动,然后反馈给其中一路入射光中的压电反射镜,压电反射镜改变入射光相对相位而锁定条纹的位置。(6) 式给出了满足全息记录要求时主动条纹锁定系统需要达到的性能参量。图 7 给出了 Fe:LiNbO₃ 晶体中 514 nm 记录波长 90°记录结构下加入主动锁定系统前后光栅衍射效率随时间的变化。

以上分析都基于假定干涉条纹振动的振幅为固定值,振动频谱为白噪声频谱,否则需要根据振动谱位移分布积分给出有效调制度。

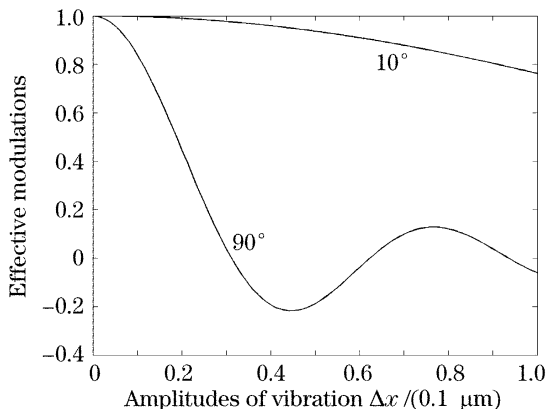


图 6 不同记录结构下条纹振幅对有效调制度的影响
Fig. 6 Effects of the amplitude of fringe vibration on effective modulations for different recording structures

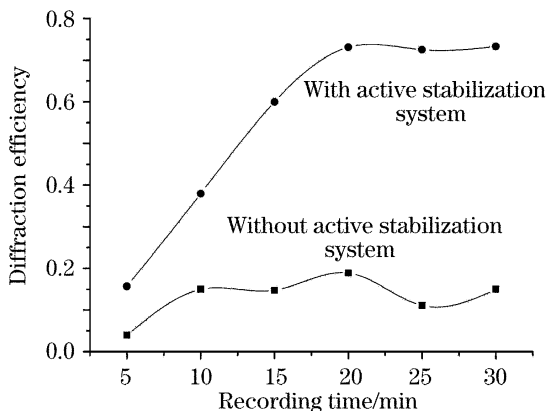


图 7 514 nm 单模激光记录在加入主动锁定系统前后的记录结果

Fig. 7 Results of recording with 514 nm single-mode laser before and after the employment of an active stabilization system

3 结 论

从局域光栅的衍射、微观光学参量对双中心全息记录的影响、实验环境这三个方面探讨全息记录特别是双中心全息记录中 90°记录结构衍射效率较低的原因,并给出改善这三个方面的建议和需要达到的阈值。其逻辑关系是双中心全息记录中非优化的微观光学参量导致较低的折射率变化量,同时实验环境对全息记录的影响导致较低的有效调制度因而产生较低的折射率变化量,这两个因素共同作用导致更低的折射率变化量,而根据局域光栅的衍射特性将导致相比透射记录结构低得多的衍射效率。

因此需要在局域光栅的衍射的指导下分别优化微观光学参量与补偿实验环境对全息记录的影响。对折射率变化均匀的 90°记录光栅,由于局域衍射的特性,为达到高的衍射效率,折射率变化量有一个与记录光束宽度相关的阈值。对 633 nm 波长、光束宽度 2 mm 的全息记录,达到 60% 以上衍射效率其折射率变化量应大于 10^{-4} 。对 (Fe, Mn):LiNbO₃ 晶体中的双中心全息记录,90°情况下优化的深中心氧化率范围为 0.15~0.25,优化的记录光与敏化光的光强比范围为 20~50;同时考虑到晶体吸收导致的平均调制度下降,为实现 60% 以上衍射效率,记录光的光束宽度应大于 6 mm。为避免实验环境导致的折射率变化量下降幅度小于 20%,主动锁定系统在 633 nm 波长,90°全息记录下应保持干涉条纹振动幅度不超过 12 nm。

参 考 文 献

- 1 F. H. Mok, M. C. Tackitt, H. M. Stoll. Storage of 500 high-resolution holograms in a LiNbO₃ crystal[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(8): 605~607
- 2 Fai H. Mok. Angle-multiplexed storage of 5,000 holograms in lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(11): 915~917
- 3 D. Psaltis, F. Mok. Holographic memories[J]. *Scient. Amer.*, 1995, **273**(5): 70~76
- 4 Yunping Yang, Ali Adibi, Demetri Psaltis. Comparison of transmission and the 90-degree holographic recording geometry [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(17): 3418~3427
- 5 Zhou Yu, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. The vectorial analyses and the optimization of recording direction in two-center holographic recording[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 230~237 (in Chinese)
- 6 周 煜,刘立人,刘德安等. 双中心全息记录的矢量分析与记录方向优化[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 230~237
- 6 H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *Bell Syst. Technol. J.*, 1969, **48**(9): 2909~2947
- 7 A. Adibi, K. Buse, D. Psaltis. Two-center holographic recording[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(5): 584~601
- 8 Richard P. Kenan. Theory of diffraction of guided optical waves by thick holograms[J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(10): 4545~4551
- 9 R. P. Kenan. Theory of crossed-beam diffraction gratings[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1978, **QE-14**(12): 924~930
- 10 L. Solymar. A general two-dimensional theory for volume holograms[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **31**(12): 820~822
- 11 M. G. Moharam, T. K. Gaylord, R. Magnusson. Diffraction characteristic of three-dimensional crossed-beam volume gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, **70**(4): 437~442
- 12 Yan aimin, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Diffraction characteristics of local volume holographic gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1203~1208 (in Chinese)
- 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