

体全息成像系统中非周期体光栅的深度选择性研究

林 琳^{1,2} 万玉红^{1,2} 陈 昊^{1,2} 伍江涛^{1,2} 江竹青^{1,2} 陶世荃^{1,2}

(¹ 北京工业大学微纳信息光子技术研究所, 北京 100124)
² 北京工业大学应用数理学院, 北京 100124)

摘要 由一束球面波和一束平面波或者两束球面波干涉所形成的体全息光栅, 由于其光栅矢量在全息图体积内是随位置的变化而变化的, 所以被称为非周期型的体光栅。主要研究了用于体全息三维成像系统的非周期体光栅的深度选择性。根据叠加的原理, 将非周期体光栅看作多个固定周期的基元体光栅的叠加, 结合耦合波理论分析非周期体光栅的衍射特性。采用这一方法, 利用 Matlab 软件模拟, 研究了两束记录光夹角对所记录的非周期体光栅深度选择性的影响和在两束记录光夹角相同时, 球面参考光体全息成像系统及平面参考光体全息成像系统深度选择性的差别, 最后在光折变晶体材料中进行非周期型和周期型体光栅的记录和再现, 对模拟结果进行了实验验证。

关键词 光栅; 全息体光栅; 体全息成像; 衍射效率; 深度选择性

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0409003

Depth Selectivity of Aperiodic Volume Grating in Holographic Imaging System

Lin Lin^{1,2} Wan Yuhong^{1,2} Chen Hao^{1,2} Wu Jiangtao^{1,2}

Jiang Zhuqing^{1,2} Tao Shiquan^{1,2}

(¹ Institute of Information Photonics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)
² College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract The volume grating formed by interference of one spherical wave and a planar wave is aperiodic due to its grating vector changes within the volume of hologram. The depth selectivity of aperiodic volume holographic gratings is investigated as spatial-spectral filters in volume holographic imaging systems. The diffractive characteristics of aperiodic volume holographic grating is analyzed by regarding it as an ensemble of local planar gratings cooperating with Kogelnik coupled-wave method. The depth selectivity of an aperiodic and a periodic grating are simulated respectively, and the effect of recording angle on the depth selectivity of aperiodic grating is simulated. Experiments of recording and retrieving volume gratings in photorefractive crystal are designed and implemented in order to verify our simulation results.

Key words gratings; holographic volume grating; volume holographic imaging; diffraction efficiency; depth selectivity

OCIS codes 090.7330; 050.2770; 050.1970

1 引 言

体全息光栅由于具有严格的布拉格波长和角度选择性, 可以用作空间-光谱滤波和衍射成像元

件^[1]。也可以在记录材料的共同体积内进行复用记录多个光栅, 应用于高密度的体全息存储器^[2], 体全息三维层析成像^[3]等。2004 年 Arnab Sinha 等^[4]提

收稿日期: 2011-10-19; **收到修改稿日期**: 2011-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(61107002)、北京市人才强教深化计划-中青骨干教师项目(00600054R1003)、10 科研基地-科技创新平台-自然科学基础研究创新平台项目(JX006111201001)和北京市教委科研项目(KM200910005033)资助课题。

作者简介: 林 琳(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学信息处理方面的研究。E-mail: linlin_86@emials.bjut.edu.cn

导师简介: 万玉红(1976—), 女, 副教授, 主要从事全息及光信息处理等方面的研究。

E-mail: yhongw@bjut.edu.cn(通信联系人)

出体全息成像技术,对体全息光栅应用于显微成像进行了研究,并利用复用记录的多重体全息光栅将待测样品不同深度层的信息成像在探测器平面的不同位置。目前麻省理工学院通过体全息成像系统实现了对微小机电零件^[5]及老鼠脂肪不同深度的同时成像^[6]。体全息光栅的性能直接影响着系统最终的成像质量和成像分辨率,因此研究体光栅的优化记录条件及其衍射特性,尤其是深度选择性,对于体全息三维层析成像是十分必要的。

体全息光栅按光栅矢量的特征可分为周期型和非周期型。周期型体光栅是由两束平面波干涉所形成的体光栅,其光栅矢量在全息图体积内均为同一个恒定的值。非周期型体光栅是由一束球面波和一束平面波或者两束球面波干涉形成的体光栅,其光栅矢量在全息图体积内随位置变化而变化。相应地,利用体全息光栅作为深度选择器件进行三维层析成像的系统也有两种情形:采用非周期型体光栅的球面波参考光体全息成像系统和采用周期型体光栅的平面参考光体全息成像系统^[4]。在所记录的体光栅半径对深度选择性的影响方面已进行了初步的研究^[7]。2010年,Yuan Luo等^[8]综合了近似耦合波理论、严格耦合波理论和几何光线追踪的方法,研究了平面参考光体全息成像系统中体全息光栅和复用的体光栅的衍射特性,并整体考虑系统的优化设计。但是,对于球面参考光体全息成像系统中记录光夹角等条件参数对非周期体光栅深度选择性的影响却未见报道。

采用并发展了文献^[8]中对非周期体光栅衍射特性的分析方法,结合 Matlab 软件模拟,较全面的研究了不同的体全息成像系统中透射型体全息光栅的深度选择性。对于平面参考光体全息成像系统,用球面波再现周期型体光栅时,将再现的球面波看作一系列平面波的组合,再应用 Kogelnik 的耦合波理论^[9]来分析其衍射特性。在球面参考光体全息成像系统中,用球面波再现非周期体光栅时,根据叠加的原理,将非周期体光栅看作多个固定周期的基元体光栅的叠加,并结合耦合波理论分析非周期体光栅的衍射特性。本文研究了两束记录光夹角对所记录的非周期体光栅深度选择性的影响;并在两束记录光夹角相同时,分别研究球面参考光体全息成像系统与平面参考光体全息成像系统深度选择性的差别,并在光折变晶体材料中进行非周期及周期体光栅的记录和再现,对模拟结果进行实验验证。

2 基本理论

当记录介质较厚(厚度比记录的干涉条纹间距大得多)时,两相干光束在介质内相互干涉,形成三维光栅状全息图,称为体积全息图或者体光栅。这种全息图的吸收系数和折射率是周期性变化的,对光的衍射作用如同三维光栅的衍射,再现时,仅当满足布拉格条件时,即

$$2\Delta n \sin \theta = \lambda, \quad (1)$$

衍射振幅才最大。(1)式中 λ 为照明光束在真空中的波长, n 为介质的折射率, θ 为照明光束与峰值条纹面之间的夹角(布拉格角), Δ 为峰值条纹面的间距。从(1)式可以看出,体积全息图的这一布拉格选择性,不仅与记录介质的厚度有关,还与光栅间距和布拉格角有关。

Kogelnik 首先将耦合波理论应用于分析体光栅的衍射,其主要思想是从麦克斯韦方程出发,根据记录介质的电学和光学参量,直接求解描述照明光波和衍射光波的耦合波微分方程组,得到衍射效率。对于无吸收透射型相位体光栅,其衍射效率为

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

式中

$$\nu = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda (\cos \theta_r \cos \theta_s)^{1/2}}, \quad (3)$$

$$\xi = \frac{\delta d}{2 \cos \theta_s}. \quad (4)$$

式中 θ_s 和 θ_r 分别为衍射光波和再现光波的角度, Δn 为折射率的空间调制幅度。

当再现光波的入射角对布拉格入射角(即写入时的参考角 θ_0)的偏离为 $\Delta\theta$ 并且波长对布拉格波长(即写入时的真空波长 λ)的偏移量为 $\Delta\lambda$ 时,相位失配因子 δ 可表示为

$$\delta = \Delta\theta K \sin(\varphi - \theta_0) - \frac{\Delta\lambda |\mathbf{K}|^2}{4\pi n}, \quad (5)$$

式中 φ 为光栅的倾斜角, d 为介质的厚度, \mathbf{K} 为光栅矢量。

通常可以直接利用耦合波理论来分析周期型的体光栅的衍射特性。但对于非周期型的体光栅,其衍射的情形要复杂得多,需要恰当地运用耦合波理论进行分析。如图1所示为一束球面波与一束平面波干涉形成的体全息光栅,其光栅矢量 \mathbf{K} 在全息图体积内是不断变化的。当 $d \ll r$ (r 是点源到记录介质的位置)时,且记录介质的半径 R 远小于记录及再现点源距记录介质的距离时,可近似认为记录波前在记录材料局部区域位置变化足够缓慢,将非周

期体光栅分解为很多微小的周期一致的体光栅^[10]。计算每一局部周期型体光栅对应的光栅矢量 \mathbf{K}_i 及对应的参考光的入射角 θ_i 。再现时,对于轴上某一位置的再现点源,可将其分解为对应的局部部分,计算每一部分的布拉格失配量,进而根据耦合波理论计算每一基元体光栅的衍射效率。

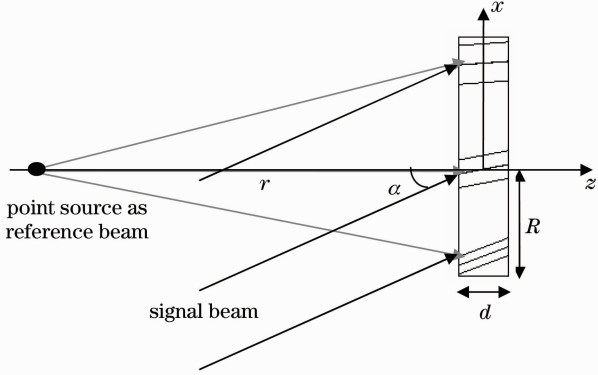


图 1 球面参考光与平面光波记录透射式非周期型体光栅示意图^[8]

Fig. 1 Schematic of an aperiodic transmission volume grating formed by one spherical wave and a planar wave

根据文献[8],整个光栅的衍射效率认为是由所有基元周期型体光栅的衍射效率叠加后的算术平均值所决定的:

$$\eta_{\text{total}} = \left(\sum_i^N \eta_i \right) / N, \quad (6)$$

式中 N 为整个非周期型体光栅所分解的周期型基元体光栅的个数。最终可求出对于每个再现位置整个光栅的衍射效率。本文中取光栅衍射效率读出曲线的值下降到峰值衍射效率的一半时曲线的宽度,即半峰全宽(FWHM),作为体光栅的深度选择性。

3 理论模拟与实验

3.1 不同夹角下信号光与参考光记录透射型非周期体光栅深度选择性研究

参与干涉的两束光夹角直接影响所形成的体光栅的光栅矢量,最终将影响到体光栅的深度选择性。为了研究记录光夹角对非周期体光栅深度选择性的影响,取 $R=3.5 \text{ mm}$, $N=4900$,利用 Matlab 模拟了不同记录光夹角 α 对应的光栅衍射效率读出曲线,模拟中的夹角 α 是指平面光与球面光主光线(z 轴)的夹角。沿 z 轴方向改变再现点源读出位置,所得到的衍射效率读出曲线如图 2 所示。

分别模拟了不同角度下 z 轴方向衍射效率读出曲线,求出对应的衍射效率曲线的深度选择性,根据

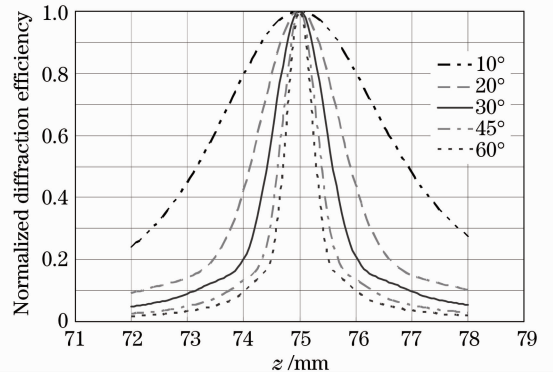


图 2 z 轴方向衍射效率随记录光夹角 α 的变化曲线
Fig. 2 Normalized diffraction efficiency versus z -axial location at different angle of point source and plane wave

其值得出图 3 曲线,可以看出,随着信号光与参考光介质外夹角 α 的增大,读出衍射效率线的 FWHM 先是迅速减小(深度选择性变好),然后趋于稳定。

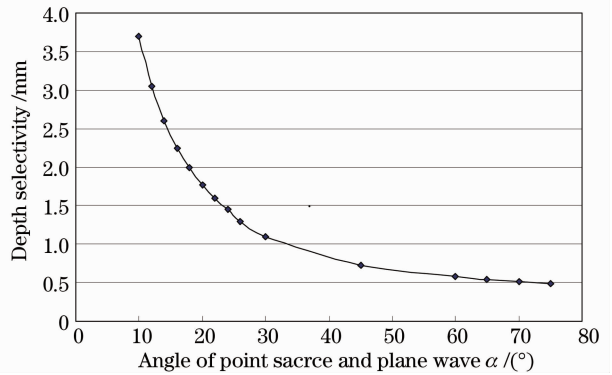


图 3 深度选择性随平面信号光与球面参考光主光线介质外夹角 α 变化曲线

Fig. 3 Depth selectivity versus angle of spherical-wave reference light beam from point source and plane-wave light beam

3.2 球面光再现透射式周期与非周期体光栅的衍射特性分析

对于不同的体全息成像系统,当两束记录光夹角相同时,均涉及球面光波再现的问题。因此对球面参考光体全息成像系统及平面参考光体全息成像系统中应用的体全息光栅采用相同的记录夹角,研究两类体全息成像系统中体光栅的深度选择特性的差别。

在数值模拟过程中,采用的记录参数为参考点源位置 z_r 为 75 mm ,平面信号光与球面(或平面)参考光线(z 轴)夹角 α 为 30° ,记录光波长 λ 为 532 nm ,记录体光栅厚度 d 为 2 mm ,光栅尺寸半径 R 为 3.5 mm ,记录介质折射率 n 为 2.2 ,模拟时取 $N=4900$ 。在上述记录条件下,采用 3.1 节提到的分析方

法,对球面波再现透射式非周期型及周期型体光栅的衍射效率随再现点源轴向位置变化进行了模拟研究。模拟的结果如图 4 所示。由模拟结果可以看出,非周期型深度选择性约为 1.17 mm,周期型深

度选择性约为 1.7 mm。在如上光学配置下,球面参考光体全息成像系统的深度选择性略优于平面参考光体全息成像系统。

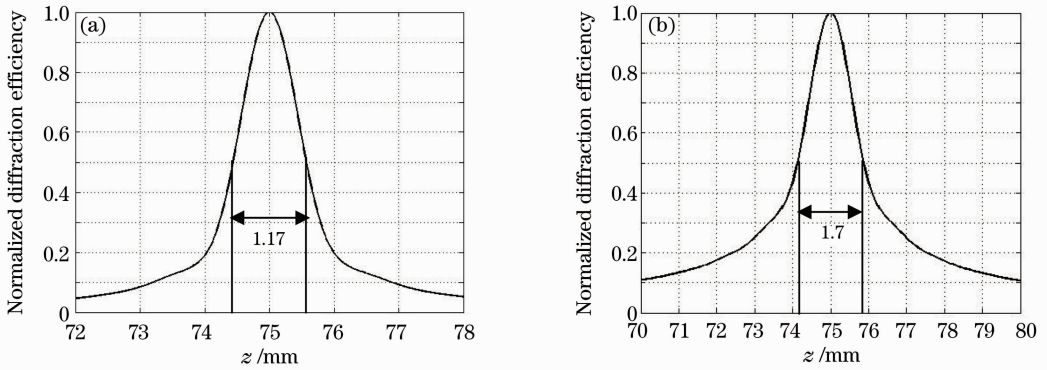


图 4 不同类型体光栅的归一化衍射效率随点源轴向位置变化曲线(a)非周期型体光栅;(b)周期型体光栅

Fig. 4 Normalized diffraction efficiency of different types of volume grating versus the axial location of reconstructed point source. (a) Aperiodic volume grating; (b) periodic volume grating

3.3 球面波再现透射式非周期和周期型体光栅的实验研究

为了验证理论分析和数值模拟结果,根据模拟的条件,设计实验,在厚度为 2 mm 的掺铁 LiNbO₃ 晶体中(材料的折射率 $n=2.2$)记录和再现非周期型体光栅及周期型的体光栅,研究其深度选择特性。记录时光源采用了半导体抽运的固体激光器,记录光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$,记录光栅尺寸半径 $R = 3.5 \text{ mm}$,两束记录光夹角 $\alpha = 30^\circ$ 。

对于球面参考光体全息成像系统,参考光距离记录介质 75 mm 时记录非周期型体光栅。球面参

考光体全息成像系统读出实验设置如图 5(a)所示,激光器出射的激光通过扩束准直系统 BE,成为平行光,再经过透镜 L₁ 聚焦为点光源,形成球面光,经过非周期型体光栅(VH)衍射,衍射光经透镜 L₂ 在功率计上得到衍射光强。再现点源距材料初始距离 $z_r = 75 \text{ mm}$,当再现点源沿 z 轴变化时,得到衍射光强随 z 轴的变化曲线。数值模拟及实验得到的曲线如图 5(b)所示。可以看出,当再现光位于布拉格匹配位置(即记录点源位置 $z = 75 \text{ mm}$)时,衍射效率最大。并且衍射效率随再现光沿 z 轴偏移量的增大迅速降低。该理论模拟结果与实验结果十分吻合。

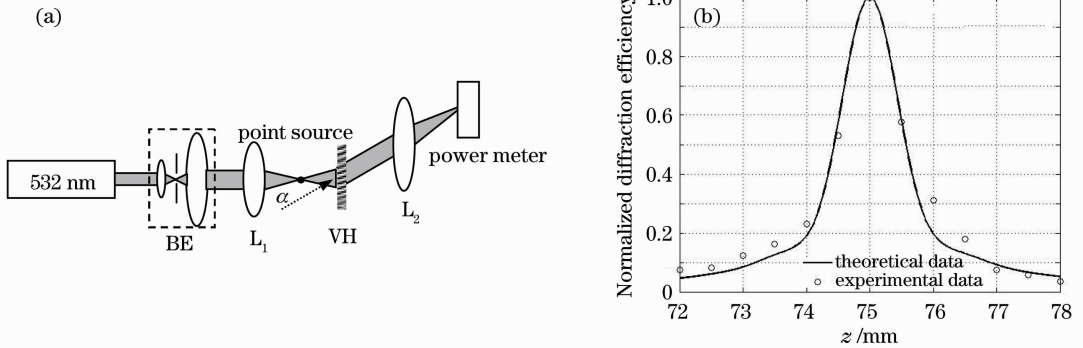


图 5 球面参考光体全息成像系统和衍射效率曲线。(a)读出光路;(b)衍射效率曲线

Fig. 5 Experimental setup of spherical reference volume holographic imaging system and normalized diffraction efficiency versus axial location. (a) Experimental setup; (b) normalized diffraction efficiency versus axial location

对于平面参考光体全息成像系统,系统读出实验设置如图 6(a),激光器产生激光,通过扩束准直系统 BE,成为平行光,经过透镜 L₁ 形成点光源后经过透镜 L₂,参考点源距透镜 L₂ 距离 $z_r = 75 \text{ mm}$,透

镜焦距 $f = 75 \text{ mm}$,透镜距离记录材料的距离为 85 mm。再经过周期型体光栅(VH)衍射,衍射光经透镜 L₃ 在功率计上测量衍射光强。当点源沿 z 轴变化时,得到衍射光强随 z 轴变化曲线。数值模

拟计算曲线和实验曲线如图 6(b)所示,理论模拟与实验十分吻合。当再现光处于布拉格匹配位置(即位于记录点源位置 $z=75$ mm)时,衍射效率最大。

且衍射效率随再现光沿 z 轴偏移量的增大迅速降低。

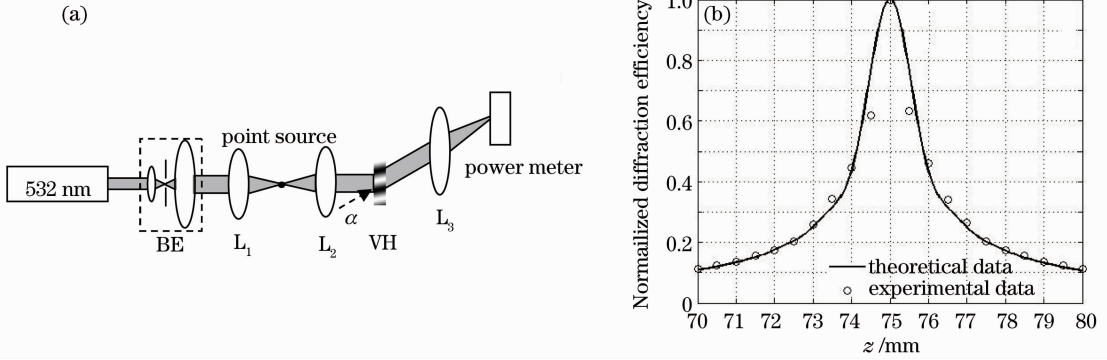


图 6 平面参考光体全息成像系统和衍射效率曲线。(a) 读出光路;(b) 衍射效率曲线

Fig. 6 Experimental setup of planar reference volume holographic imaging system and normalized diffraction efficiency versus axial location. (a) Experimental setup; (b) normalized diffraction efficiency versus axial location

4 结 论

根据叠加原理,将非周期型体光栅看做多个固定周期的基元体光栅的叠加,结合耦合波理论着重分析了用于体全息成像系统的非周期体光栅的深度选择性。研究表明,随着信号光与参考光夹角 α 的增大,非周期体光栅的深度选择性变好,当两束光夹角大于 60° 时,深度选择性趋于稳定,基本不再变化。可以通过改变信号光与参考光外夹角 α ,在一定程度上提高深度选择性。在两束记录光夹角相同的情况下,对球面参考光体全息成像系统与平面参考光体全息成像系统的深度选择性进行模拟与实验研究,结果表明,球面参考光体全息成像系统的深度选择性要略优于平面参考光体全息成像系统。

参 考 文 献

- Zheng Guangwei, Tan Jichun, Shen Benjian *et al.*. Research on harmonic wave separation and beam sampling characteristics of superposed volume Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0305001
- 郑光威, 谭吉春, 沈本剑等. 复用体布拉格光栅的谐波分离以及光束取样特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0305001
- Wan Yuhong, Tao Shiquan, Yuan Wei *et al.*. Experimental study on high-density holographic disk storage with batch thermal fixing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 361~364
- 王玉红, 陶世荃, 袁 犇等. 高密度盘式全息存储及其热固定的

- 实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 361~364
- Sun Yajun, Jiang Zhuqing, Liu Shaojie *et al.*. Resolution characteristics of volume holographic imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1454~1458
- 孙亚军, 江竹青, 刘少杰等. 体全息成像系统的深度分辨特性分析[J]. *光子学报*, 2009, **38**(6): 1454~1458
- Arnab Sinha, Wenyang Sun, Tina Shih *et al.*. Volume holographic imaging in transmission geometry[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(7): 1533~1551
- Arnab Sinha, George Barbaststhis. Volume holographic for surface metrology at long working distances[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(24): 3202~3209
- Yuan Luo, Paul J. Gelsinger-Austin, Jonathan M. Watson *et al.*. Laser-induced fluorescence imaging of subsurface tissue structures with a volume holographic spatial-spectral imaging system[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(18): 2098~2100
- Yang Jing. Imaging Characteristics of a Volume Holographic Lens[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010. 25~30
- 杨 婧. 体全息透镜的成像特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010. 25~30
- Yuan Luo, Jose Castro, Jennifer K. Barton *et al.*. Simulations and experiments of aperiodic and multiplexed gratings in volume holographic imaging systems[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(18): 19273~19285
- Tao Shiquan, Jiang Zhuqing, Wang Dayong *et al.*. Holographic Optics Storage [M]. Beijing: Publishing House of Beijing University of Technology, 1998. 58~75
- 陶世荃, 江竹青, 王大勇等. 光全息存储[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1998. 58~75
- R. R. A. Syms, L. Solymar. Localized one-dimensional theory for volume holograms[J]. *Opt. & Quantum Electron.*, 1981, **13**(5): 415~419