

多重体光栅等衍射效率写入方法研究

耿涛 彭峰 孙伟民 姜志远 张涛

(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 体全息的多重存储需要解决两个问题:一是复用的全息图达到最大的衍射效率,使复用全息图的数目最大;二是使重构的每个全息图的衍射效率均相等。在多重体光栅中后写入的全息图会对之前的全息图产生擦除效应,进而导致最终各全息图的光栅折射率调制深度不同,衍射效率会呈明显的不均匀性。利用光折变效应的动力学方程,定量分析了晶体的有效电光系数(r_{eff})、稳态空间电荷场(E_{sc})等影响饱和和折射率调制制度的因素与耦合光路几何组态的关系。 r_{eff} 与 E_{sc} 会随着所记录的不同光栅矢量与光轴的夹角以及晶体内参考光与物光夹角的变化而不同。通过考虑这些因素对被记录全息图的光栅折射率调制制度的影响,对多重体光栅写入方法进行了修正,得到了改进后的曝光时序。最后,采用该写入方法完成了多重体光栅的存储,并对多重体光栅衍射强度进行了分析。实验结果表明,此方法使多重全息图存储中的衍射效率均匀化问题得到明显改善。

关键词 全息;体光栅;衍射效率;饱和折射率调制制度;光折变晶体

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0316

Study on Write-in Method about Multiple Volume Gratings Diffraction Efficiency

Geng Tao Peng Feng Sun Weiming Jiang Zhiyuan Zhang Tao

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract There are two questions that the multiple storage of volume holographic needs to solve: firstly, the multiplexed hologram should have the maximum diffraction efficiency to achieve the largest number of multiplexed hologram; secondly, the diffraction efficiencies of each reconstructed hologram should be equal. In multiple volume gratings, the latter writing hologram will engender erase effect for the former writing hologram, thus leading to the grating refractive index of the holograms with different modulation depth at last, and the diffraction efficiency will have a significant heterogeneity. This relationship between the factors which affect the modulation depth of saturated refractive index, such as the crystal effective electro-optic coefficient r_{eff} , steady-state space charge field E_{sc} and the coupled light road geometric configuration is quantitatively analyzed. r_{eff} and E_{sc} will be different with the change of different grating vector, the angle of optical axis and the angle between the object light and the reference light which are recorded by the kinetic equation of photorefractive effect. Considering these factors the write-in method of multiple volume gratings is amended, and the improved timing of the exposure is given. Finally, we complete the storage of multiple volume gratings and the analysis of multiple volume gratings diffraction efficiency by the method. The experimental results show the uniform diffraction efficiency in multiple hologram storage has been markedly improved.

Key words holography; volume grating; diffraction efficiency; modulation depth of saturated refractive index; photorefractive crystal

1 引 言

体全息存储技术以其高存储密度、高冗余度、可进行并行内容寻址、数据传输速率快,存取时间短以及抗干扰能力强等特点,在军事、商业、医学等诸多领域具有极其广阔的应用前景,引起了人们广泛的

关注与研究^[1~3]。

光折变全息存储是动态存储,后续记录的相位栅会部分擦除前面记录的相位栅。因此,如果使用相同的曝光时间和相同的光强分别记录所有全息图,会导致最终的各光栅折射率调制制度 Δn 各不相

同,进而使所记录的全息图之间,衍射效率呈明显的不均匀性。先记录的全息图的衍射效率将低于后续记录的全息图的衍射效率,各全息图的衍射效率将随记录的全息图数目 M 的增加而下降。

体全息的多重存储需要解决涉及衍射效率的两个问题,一是为了充分利用记录材料的潜力,即应该使所复用的全息图达到最大的衍射效率,或者说对于给定的衍射效率使复用全息图的数目最大;二是使重构的每个全息图的衍射效率均相等。对于体全息存储而言,由于两个方面相互牵制,所以实现起来较为复杂。作为实际的存储器,要求角度复用存储的各个体全息存储图像具有尽可能相等的衍射效率。

2 理论分析

在写入和擦除过程中,记录材料的折射率调制度随时间变化可分别表达为^[4~6]

写入过程

$$\Delta n(t_w) = \Delta n_{\text{sat}} [1 - \exp(-t_w/\tau_w)], \quad (1)$$

擦除过程

$$\Delta n(t_E) = \Delta n_0 \exp(-t_E/\tau_E), \quad (2)$$

式中 τ_w 和 τ_E 分别为写入和擦除时间常量, t_w 和 t_E 分别为写入和擦除过程的曝光时间, Δn_{sat} 为饱和折射率调制度, Δn_0 为擦除过程的折射率调制度初始值。

若要获得均匀的衍射效率,则要使各光栅的折射率调制度相等。光栅饱和和折射率调制度可表示为

$$\Delta n_{\text{sat}} = -\frac{1}{2} n_0^3 r_{\text{eff}} E_{\text{sc}}. \quad (3)$$

从式(3)可以看出,若各全息图的饱和折射率调制度相等,则各全息图的 r_{eff} 和 E_{sc} 的大小应该一致。然而,由于 r_{eff} 和 E_{sc} 均与在记录不同全息图时耦合光路的几何配置有关,所以每幅全息图的饱和折射率调制度并不会严格意义上的相等。饱和折射率调制度是影响体全息图衍射效率不均匀的重要因素,忽略这一因素,不易得到更加理想的衍射效率均匀化的效果^[7~11]。

对 r_{eff} 及 E_{sc} 与几何组态关系的分析可知, r_{eff} 与 E_{sc} 会随着所记录的不同光栅的矢量 \mathbf{K} 与光轴 c 的夹角以及晶体内参考光 R 与物光 S 夹角的变化而不同。在角度复用的多重全息存储中,每记录一幅全息图都需要改变参考光与物光的夹角,各光栅矢量与光轴间夹角也会随之变化。

以旋转参考光方向进行复用且 s 偏振光 30° 的写入光路组态为例,设在记录第一幅全息图时,两记录光束间的夹角为 $2\theta = 30^\circ$, 当记录参考光每旋转 $2\Delta\theta$ 时,相应的光栅矢量方向与上一幅光栅矢量比较方向改变了 $\Delta\theta$, 则此光栅矢量与 c 轴的夹角也改变了 $\Delta\theta$, 这样对应于第二幅全息图的晶体有效电光系数 $r_{\text{eff}}(2)$ 可表示为

$$r_{\text{eff}}(2) = r_{13} \cos(\beta + \Delta\theta). \quad (4)$$

其中 β 为光轴与波矢间夹角。空间电荷场为

$$E_{\text{sc}}(2) = \sqrt{\frac{E_{\text{oph}}^2 \cos^2(\beta + \Delta\theta) + A^2 \sin^2(\theta + \Delta\theta)}{\{1 + \epsilon A \sin^2(\theta + \Delta\theta)/B\}^2 + [\epsilon E_{\text{oph}} \cos(\beta + \Delta\theta) \sin(\theta + \Delta\theta)/B]^2}}, \quad (5)$$

由此可知

$$r_{\text{eff}}(N) = r_{13} \cos[\beta + (N-1)\Delta\theta], \quad (6)$$

$$E_{\text{sc}}(N) = \sqrt{\frac{E_{\text{oph}}^2 \cos^2[\beta + (N-1)\Delta\theta] + A^2 \sin^2[\theta + (N-1)\Delta\theta]}{\{1 + \epsilon A \sin^2[\theta + (N-1)\Delta\theta]/B\}^2 + \{\epsilon E_{\text{oph}} \cos[\beta + (N-1)\Delta\theta] \sin[\theta + (N-1)\Delta\theta]/B\}^2}}. \quad (7)$$

第 N 幅光栅的饱和折射率调制度 $\Delta n_{\text{sat}}(N)$ 为

$$\Delta n_{\text{sat}}(N) = -\frac{1}{2} n_0^3 r_{\text{eff}}(N) E_{\text{sc}}(N). \quad (8)$$

针对记录光路的组态,通过计算模拟出各幅光栅所对应的饱和折射率调制度 $\Delta n_{\text{sat}}(N)$ 的差异程度,如图 1 所示。可以看出不同的记录光栅之间存在很明显的饱和折射率调制度差异。

通过分析可知,在角度复用的多重全息存储中,各光栅的饱和折射率调制度 Δn_{sat} 的不同也是影响衍射效率曝光最终效果的重要因素。因此在修正以往的曝光方案时,将此因素也考虑在内。

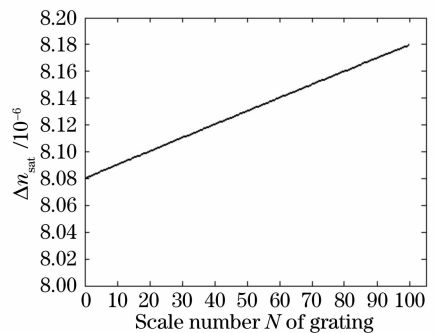


图 1 不同光栅对应的 Δn_{sat} 曲线

Fig. 1 Δn_{sat} curve corresponding to different grating

为使每幅全息图的衍射效率相等,则写入的各幅全息光栅的折射率调制度应该相等,令

$$\Delta n_1 = \Delta n_2 = \dots = \Delta n_N \dots \Delta n_M = \frac{k\Delta n_0}{M}, \quad (9)$$

式中 $0 < k < 1$, M 为记录全息图的总数, Δn_0 为折射率变化量的最大值,顺次记录的第 N 幅全息光栅的折射率调制度为

$$\Delta n_N = \Delta n_{\text{sat}}(N) \left[1 - \exp\left(-\frac{t_N}{\tau_w}\right) \right] \exp\left(-\frac{T_N}{\tau_E}\right). \quad (10)$$

由(9)式可得

$$\Delta n_{\text{sat}}(N) \left[1 - \exp\left(-\frac{t_N}{\tau_w}\right) \right] \exp\left(-\frac{T_N}{\tau_E}\right) = \frac{k\Delta n_0}{M}, \quad (11)$$

进而得到第 N 幅图像的曝光时间递推表达式为

$$t_N = -\tau_w \ln \left[1 - \frac{k\Delta n_0}{M\Delta n_{\text{sat}}(N)} \exp\left(\frac{T_N}{\tau_E}\right) \right], \quad (12)$$

由于最后一幅全息图未受到擦除效应,所以 $T_M = 0$, 则

$$t_M = -\tau_w \ln \left[1 - \frac{k\Delta n_0}{M\Delta n_{\text{sat}}(M)} \right], \quad (13)$$

第 $M-1$ 幅图像为

$$t_{M-1} = -\tau_w \ln \left[1 - \frac{k\Delta n_0}{M\Delta n_{\text{sat}}(M-1)} \exp\left(\frac{t_M}{\tau_E}\right) \right], \quad (14)$$

$$t_{M-N} = -\tau_w \ln \left[1 - \frac{k\Delta n_0}{M\Delta n_{\text{sat}}(M-N)} \exp\left(\sum_{i=0}^{N-1} -\frac{t_{M-i}}{\tau_E}\right) \right], \quad (15)$$

$$t_1 = -\tau_w \ln \left[1 - \frac{k\Delta n_0}{M\Delta n_{\text{sat}}(1)} \exp\left(\sum_{i=0}^{M-2} -\frac{t_{M-i}}{\tau_E}\right) \right], \quad (16)$$

利用倒推法同样得到各幅全息图的折射率调制度,第 N 幅光栅的折射率调制度为

$$\Delta n_N = \Delta n_{\text{sat}}(N) \left[1 - \exp\left(-\frac{t_N}{\tau_w}\right) \right] \exp\left(-\frac{T_N}{\tau_E}\right), \quad (17)$$

$$\text{由(17)式倒推可以得到} \quad \Delta n_1 = \Delta n_{\text{sat}}(1) \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_w}\right) \right] \exp\left(\sum_{i=0}^{M-2} -\frac{t_{M-i}}{\tau_E}\right). \quad (18)$$

3 仿真与实验结果及其分析

对推导得到的曝光时序递推公式进行计算,并在修正后的曝光时序下,模拟存储了 50 幅全息图,并通过计算得到了这 50 幅全息图的折射率调制度序列。修正后的曝光时序曲线如图 2 所示,各全息图所对应的折射率调制度如图 3 所示。使用经过修正的曝光时序,除了初始几幅光栅折射率调制度差别较大外,其它各幅的均匀性非常好,所存储的各全息图衍射效率在 50 幅之内就可以接近均匀。

为了验证分析方法的正确,分别用等时曝光与

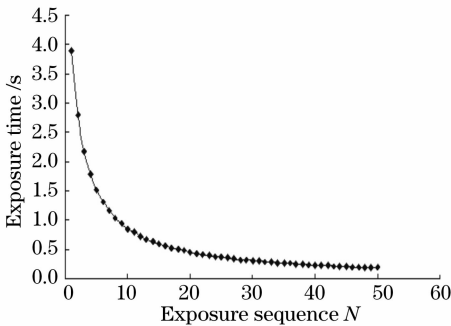


图 2 修正后的顺序曝光时序

Fig. 2 Conventional recording schedule of the improved

formulas

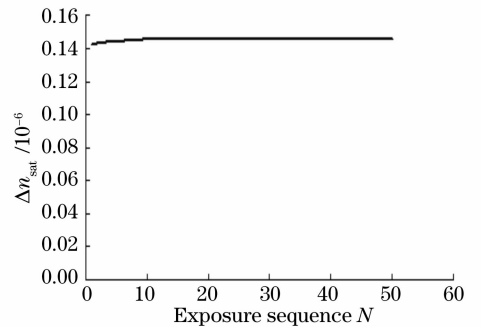


图 3 修正后曝光时序下各光栅折射率调制度

Fig. 3 Grating refractive index modulation based on exposure sequence of the improved formulas

修正后的曝光法进行了 28 幅全息图的存储。以 SLM 作为模式识别时图像模板的输入器件,当通过 SLM 的物光照射晶体时,会再现出一系列参考光的衍射光斑,其衍射光斑如图 4 和图 5 所示。

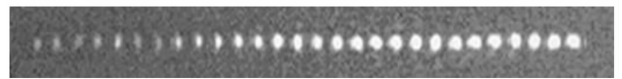


图 4 等时曝光下各光栅的衍射斑强度

Fig. 4 Grating diffraction spot intensity based on the same time exposure

将实验所得的衍射光斑图像记录,利用编程对

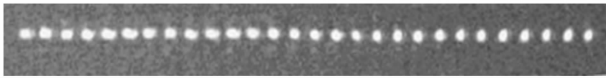


图5 修正后的曝光法下各光栅的衍射斑强度

Fig.5 Grating diffraction spot intensity based on the exposure method of the improved formulas

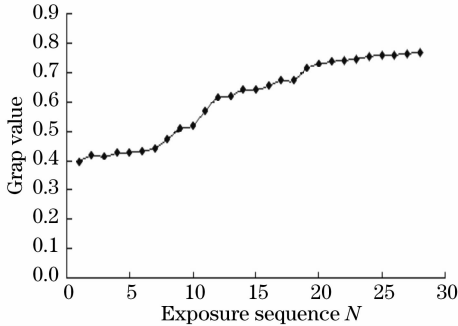


图6 等时曝光记录的各光栅衍射斑强度的灰度曲线

Fig.6 Gray value curve of grating diffraction spot intensity on the same time exposure record

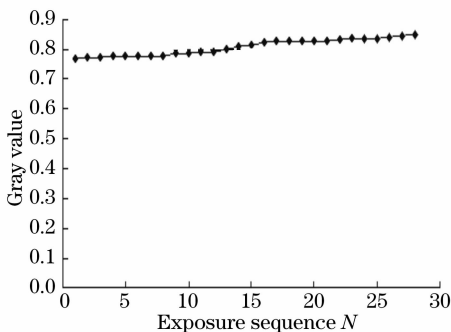


图7 修正后的曝光法记录的各光栅衍射斑强度的灰度曲线

Fig.7 Gray value curve of grating diffraction spot intensity based on exposure record of the improved formulas

各光斑的平均灰度值进行双精度计算,可以得到2种曝光情况下衍射光斑的灰度值曲线。在使用等时曝光的情况下,后期存入的全息图的光栅衍射斑灰度值(即光强)比先前存入图像的高很多,说明后期的衍射效率明显高于先前的衍射效率,衍射效率均匀性很差,如图6所示;在使用修正后的曝光法情况下,所有被记录的全息图的光栅衍射斑的光强差别不大,说明各全息图的衍射效率比较接近,衍射效率均匀性较好,如图7所示。

4 结 论

不同光栅所对应的饱和折射率调制度的不同是影响衍射效率均匀化的重要因素。定量分析了晶体的有效电光系数 r_{eff} 、稳态空间电荷场 E_{sc} 等影响饱

和折射率调制度变化的因素与耦合光路几何组态的关系。并通过考虑这些因素对被记录全息图的光栅折射率调制度的影响,对顺序曝光方案进行了修正。仿真与实验结果表明,此方案对多重体全息存储中衍射效率均匀化写入的具有明显的效果。

参 考 文 献

- 1 Tao Zhang, Biao Wang, Shuangquan Fang *et al.*. Influence of post-growth treatment on the holographic storage properties of In:Fe:LiNbO₃[J]. *Optik*, 2004, **115**(5): 197~200
- 2 G. W. Burr, C. M. Jefferson, H. Coufal *et al.*. Volume holographic data storage at an areal density of 250 gigapixels/in² [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(7): 444~446
- 3 B. H. Kang, B. K. Rhee, G. T. Joo *et al.*. Measurements of photovoltaic constant and photoconductivity in Ce, Mn: LiNbO₃ crystal[J]. *Optics Communications*, 2006, **266**(1): 203~206
- 4 Tao Shiquan, Wan Dayong, Jiang Zhuqing *et al.*. Optical Holographic Storage [M]. Beijing: Beijing University of Technology Publishers, 1998. 202~214
- 5 Wang Xiaohuai. A study on the uniformity of diffraction efficiency for demultiplex of WDM based on volume holographic technology[J]. *J. Hanshan Normal University*, 2006, **27**(3): 41~45
- 6 Wang Xiaohuai, Li Zhuofan, Hu Manli. The relation between property of high-density volume holographic storage[J]. *Applied Optics*, 2005, **26**(2): 10~14
- 7 Hu Zhijuan, Yan Aimin, Liu Dean *et al.*. Study of wave-front conversion by local volume holographic grating diffraction between cylindrical and plane waves[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1127~1131
- 8 Yan Aimin, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Diffraction characteristics of local volume holographic gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1203~1208
- 9 Wang Xin, Yan Aimin, Liu Dean *et al.*. Formation and diffraction characteristics of local volume photorefractive holographic gratings in two doped LiNbO₃:Fe:Mn crystals[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 361~365
- 10 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
- 11 Liu Qiuping, He Xingdao, Zhou Xiaochun. Correction of refractive index distribution in volume hologram grating recorded linearly[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1037~1040