

波导体全息光栅衍射光谱范围一致性研究

周家武¹, 巩华², 康明武¹, 马百恒¹

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000; 2. 空装重点型号部, 北京 100843)

摘要: 为了减小体全息光栅用于全息波导显示时不同视场角下衍射光谱的偏移, 提出选择最佳的光栅矢量倾斜角和像源光轴相对于体全息光栅的倾斜角, 可以减小衍射光谱的偏移。为了使全息波导显示系统在给定入射角度范围内具有相同的衍射光谱范围, 采用三次曝光记录了一层体全息光栅。仿真结果表明, 当像源的光谱范围在 524 ~ 540 nm 之间时, 该体全息光栅在入射角度范围 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 内的衍射光谱范围相同, 提高了给定入射角度范围内衍射光谱范围的一致性, 可以应用于全息波导显示系统中。

关键词: 体全息光栅; 全息波导; 衍射效率; 耦合波理论

中图分类号: O438.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)01-0080-04

Uniformity of Diffraction Spectrum Range of Wave-Guided Volume Holographic Grating

ZHOU Jia-wu¹, GONG Hua², KANG Ming-wu¹, MA Bai-heng¹

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Air Force Armament Department, Beijing 100843, China)

Abstract: In order to reduce the diffracted spectrum shift of the holographic wave-guided display systems within the entire field of view, the optimum slant angle of grating vector and the optimum slant angle of the image source optical axis relative to the volume grating were used. To get the same diffraction spectrum range in the given incident angular range, one-layer volume holographic grating was recorded based on three-step exposure. The numerical simulation shows that: The wavelength ranges of diffracted light are kept the same with the incident angular at -3° to 3° when the spectrum of light source is in the range of 524 nm to 540 nm. The uniformity of the diffraction spectrum range is improved, and this design can be used in holographic waveguide display systems.

Key words: volume holographic grating; holographic waveguide; diffraction efficiency; coupled-wave theory

0 引言

波导体全息光栅使用光学波导作为基底导引相干光记录全息图^[1], 和传统的全息记录系统相比, 波导体全息光栅系统具有紧凑、便携、稳健、易于对齐等优点^[2]。近年来, 体全息光栅广泛应用于显示、照明、光学互联等领域中^[3-4]。作为全息波导显示系统的重要组成部分, 波导体全息光栅也广泛应用于平显和头戴式显示器中^[5], 显示出了极大的优势。由于体全息光栅具有严格的角度和波长选择性, 在不同入射角度下衍射的中心波长和光谱范围不同, 因此, 用于全息波导

显示时易造成不同视场角下衍射光谱范围不一致的问题。日本 SONY 公司在其研发的彩色全息波导眼镜显示器中采用倾斜光轴布局来减小衍射光谱的偏移^[6], 但是效果有限; 文献[7]提出通过采用三层全息图来补偿单层全息图衍射光谱的偏移, 但是结构较复杂。为了解决体全息光栅用于全息波导显示时不同视场角下衍射光谱的偏移, 分析了衍射光谱偏移随光栅矢量倾斜角和图像源光轴相对于体全息光栅倾斜角的变化, 并采用三次曝光记录了一层体全息图, 结构简单, 很好地解决了衍射光谱范围的不一致性。

1 布拉格衍射波长随入射角度的变化

波导体全息光栅的衍射如图 1 所示, 其中, k_i , k_r 分别为再现光波和衍射光波波矢量。

收稿日期: 2014-06-18

修回日期: 2014-10-03

作者简介: 周家武(1990—), 男, 山东临沂人, 硕士生, 研究方向为全息波导技术。

考虑到光在波导中的全反射条件,同时考虑到波导体全息光栅在应用于全息波导显示时波导尺寸的限制,本文在分析过程中设定 θ 的范围为

$$\arcsin(n_1/n_2) \leq \theta \leq 65^\circ \quad (1)$$

式中: θ 为衍射光线在波导与空气临界面的反射角; n_1 为空气的折射率; n_2 为基质的折射率。

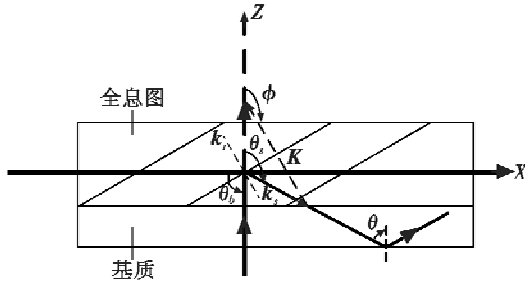


图 1 波导体全息光栅再现的几何关系

Fig. 1 Reconstruction geometry of wave-guided volume holographic grating

根据 Kogelnik 耦合波理论^[8]和衍射效率的定义可知,无吸收反射相位光栅的衍射效率为

$$\eta = \frac{sh^2(\nu^2 - \xi^2)^{1/2}}{sh^2(\nu^2 - \xi^2)^{1/2} + [1 - (\xi/\nu)^2]} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{\Delta\theta K d \sin(\phi - \theta_i) - \Delta\lambda K^2 d / 4\pi n_2}{2\cos\theta_i} \quad (3)$$

$$\nu = \frac{\pi\Delta n d}{\lambda(\cos\theta_i \cos\theta_r)^{1/2}} \quad (4)$$

式中: K 为光栅矢量; d 为记录介质的厚度; n_2 为记录介质的折射率; ϕ 为光栅矢量的倾斜角; θ_i 为再现光满足布拉格条件时与 Z 轴所夹的角度; θ_r, θ_s 分别为再现光波和衍射光波与 Z 轴所夹的角度; Δn 为全息图的折射率调制度; λ 为记录全息图时入射光在真空中的波长; $\Delta\theta$ 和 $\Delta\lambda$ 分别为入射光偏离布拉格角 θ_0 和布拉格波长 λ_0 的偏移量。

假定记录参数 $\lambda = 532 \text{ nm}$, $d = 10 \text{ }\mu\text{m}$, $\Delta n = 0.03$, $\theta_i = 0^\circ$, $\theta_s = 120^\circ$, $n_2 = 1.52$, 其中, θ_i, θ_s 分别为全息图记录时参考光和物光与 Z 轴所夹的角度。如果再现光的波长与记录时的波长相同,即式(3)中的 $\Delta\lambda = 0$,由式(2)~式(4)可得出反射体全息光栅在偏离布拉格角再现时的衍射效率,如图 2a 所示,将选择性曲线主瓣全宽度对应的角度差定义为角带宽, $\Delta\theta = 3^\circ$ 。图 2b 显示了再现光沿角带宽两端角度和记录时参考光角度方向入射时,体全息光栅衍射效率随波长的变化关系,由此可以看出,布拉格衍射波长和衍射光谱范围随着入射角的变化而变化,且具有一定的波长带宽。由于体全息光栅的布拉格衍射波长和衍射光谱范围随着入射角的变化而变化,因此,用于全息波导准直显示时,具有一定光谱范围的图像源在不同入射角度下

可被衍射的光谱范围也不相同,最终从全息波导中输出时表现为不同视场角下显示的光谱范围不相同,从而影响了各视场下显示光谱范围的一致性。

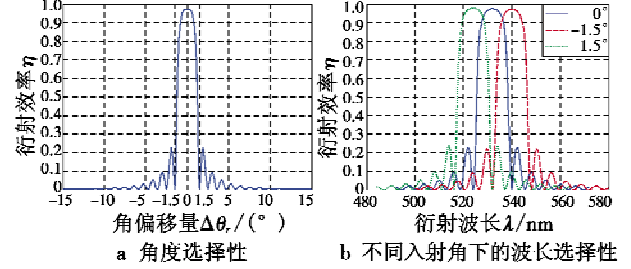


图 2 反射体全息光栅的衍射特性

Fig. 2 Diffraction properties of reflection volume holographic grating

2 一致衍射光谱范围的获得

2.1 衍射光谱偏移的减小

由上文分析可知,布拉格衍射波长随着入射到体全息光栅上角度的变化而变化,因此特定的入射角决定了特定的衍射光谱范围。为了减少给定入射角度范围内衍射光谱的偏移,提出了两种方法:

1) 使像源的光轴相对于体全息光栅倾斜实现倾斜输入和倾斜输出;

2) 改变体全息光栅光栅矢量的倾斜角。如图 3 所示,其中, ϕ, Φ 分别为光栅矢量的倾斜角和像源光轴的倾斜角。

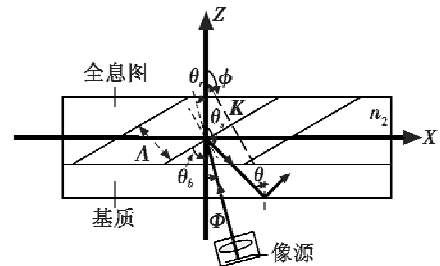


图 3 波导体全息光栅的衍射

Fig. 3 Diffraction of wave-guided volume holographic grating

当照明光入射到全息图上时,衍射的中心波长由布拉格条件给定,即

$$\lambda = 2n_2 A \sin\theta_s \quad (5)$$

式中: θ_s 为入射光线或衍射光线在满足布拉格条件时与体全息光栅条纹的夹角; A 为体全息光栅的条纹周期; n_2 为记录介质的折射率。通过对式(5)两边微分可得到 λ 随 θ_s 的变化,即

$$\delta\lambda = 2n_2 A \cos(\theta_s) \delta\theta_s \quad (6)$$

由上式可知,给定的体全息光栅,在周期 A 固定的情况下,当 θ_s 接近 90° 时, λ 随 θ_s 的变化最小,而 θ_s 与体全息光栅光栅矢量的倾斜角和像源光轴相对于体全息

光栅的倾斜角有关。

在像源光轴垂直于体全息光栅的情况下,取体全息光栅的布拉格角偏离量 $\Delta\theta = \pm 5^\circ$, $\Lambda = 202 \text{ nm}$, $n_2 = 1.52$,由式(1)可得出体全息光栅光栅矢量倾斜角可变化的范围 $150^\circ \leq \phi \leq 156^\circ$,给定入射角度范围两端衍射的中心波长差与体全息光栅光栅矢量倾斜角 ϕ 的变化关系如图 4a 所示,可得出结论,随着体全息光栅光栅矢量倾斜角的增大,给定入射角度范围两端衍射的中心波长偏差逐渐减小。在体全息光栅光栅矢量倾斜角固定的情况下,取 $\phi = 150^\circ$, $\Delta\theta = \pm 5^\circ$, $\Lambda = 202 \text{ nm}$, $n_2 = 1.52$,由式(1)可得出像源光轴倾斜角的可变化范围 $0^\circ \leq \Phi \leq 13^\circ$,给定入射角度范围两端衍射的中心波长差与像源光轴相对于体全息光栅倾斜角的变化关系如图 4b 所示,可得出结论,随着像源光轴相对于体全息光栅倾斜角的增大,给定入射角度范围两端衍射的中心波长偏差逐渐减小。

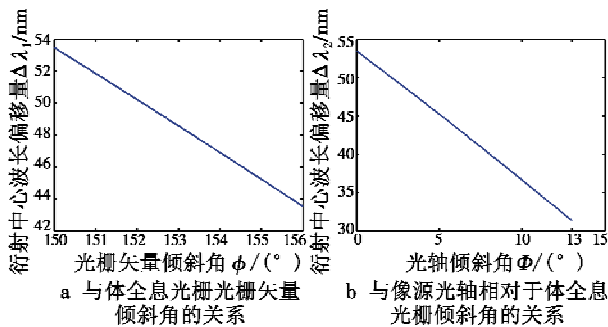


图4 给定入射角度范围两端衍射的中心波长偏差

Fig. 4 Deviation of diffracted light wave's central wavelength between both ends of a given incident angular range

研究表明,在波导体全息光栅的设计过程中,通过选择最佳的体全息光栅光栅矢量倾斜角和记录光束相对于记录介质的倾斜角可以有效减小给定入射角度范围内衍射光谱的偏移,从而用于全息波导显示时会提高各视场下显示光谱范围的一致性。

$$\Delta\lambda_1 = 4n_2\Lambda\sin\phi\sin\Delta\theta, \quad (7)$$

$$\Delta\lambda_2 = 4n_2\Lambda\cos(60^\circ + \Phi)\sin\Delta\theta. \quad (8)$$

2.2 采用三次曝光的体全息光栅的设计

由上文分析可知,通过改变体全息光栅光栅矢量的倾斜角和像源光轴相对于体全息光栅的倾斜角,尤其是改变像源光轴相对于体全息光栅的倾斜角,可以有效地减小不同入射角度下衍射光谱的偏移,但是并不能消除衍射光谱的偏移。为了实现体全息光栅在不同入射角度下衍射光谱的相互补偿,使体全息图在不同入射角度下具有相同的衍射光谱范围,本文给出了通过三次曝光记录一层体全息光栅的设计方案。记录参数如表 1 所示。

表 1 三次曝光的记录参数

Table 1 Recording parameters of three-step exposure

记录参数	第一次曝光	第二次曝光	第三次曝光
参考光	$\theta_1 + \Delta\theta_{wi}$	θ_1	$\theta_1 - \Delta\theta_{wi}$
物光	$\theta_2 + \Delta\theta_{wd}$	θ_2	$\theta_2 - \Delta\theta_{wd}$

表 1 中: $\Delta\theta_{wi}$ 为入射光的角带宽; $\Delta\theta_{wd}$ 为衍射光的角带宽。

根据 Kogelnik 假设,当再现光波长与记录光波长相同的情况下,衍射角 θ_d 由式(9)给出^[9],即

$$\theta_d = \arctan\left(\frac{\sin\theta_i - 2\cos(\phi - \theta_1)\sin\phi}{\cos\theta_i - 2\cos(\phi - \theta_1)\cos\phi}\right) \quad (9)$$

式中: θ_i 为再现光与 Z 轴的夹角; θ_1 为记录时参考光与 Z 轴的夹角; ϕ 为体全息光栅光栅矢量的倾斜角。

体全息光栅采用波长 λ 为 532 nm 的平面光波记录,记录介质采用重铬酸盐明胶,记录介质的厚度 d 为 10 μm ,折射率 n 为 1.52,体全息光栅每次曝光的折射率调制度 $\Delta n_i = 0.03$, $i = 1, 2, 3$,体全息光栅三次曝光总的折射率调制度 $\Delta n = 0.09$,在记录介质的动态范围内。每一次曝光的记录参数如表 2 所示。体全息光栅的结构如图 5 所示。

表 2 计算的三次曝光的记录参数

Table 2 The calculated value of recording parameters

for three-step exposure

记录参数	第一次曝光	第二次曝光	第三次曝光
(θ_1, θ_2)	(3, 118.57)	(0, 120)	(-3, 121.57)

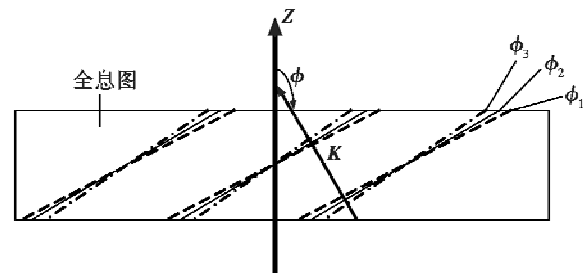


图 5 三次曝光体全息光栅的结构 ($\phi_1 = 150.79^\circ$, $\phi_2 = 150^\circ$, $\phi_3 = 149.29^\circ$)

Fig. 5 Structure of volume holographic grating based on three-step exposure

记录介质的动态范围是有限的,复用的光栅数量越多,可得到的折射率调制度越小^[10],保证三次曝光体全息光栅的总折射率调制度在记录介质的动态范围内,忽略三次曝光之间的相互影响,对三次曝光形成的体光栅分别用 Kogelnik 耦合波理论分析衍射特性,三次曝光体全息光栅总的衍射特性如图 6 所示。为了避免衍射方向的混乱,三次曝光形成体全息光栅的角带宽应该相互连接,如图 6a 所示。由图 6b 可以看出,当再现光以三次

曝光时的参考光方向($0^\circ, 3^\circ, -3^\circ$)入射时,衍射的光谱范围为524~540 nm,几乎重合;当再现光以 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 内的其他角度方向入射时,公共衍射光谱范围近似为524~540 nm,以再现光沿 1.5° 方向入射为例, ϕ_1 所指的干涉条纹可以衍射上述光谱范围中的532~540 nm, ϕ_2 所指的干涉条纹可以衍射上述光谱范围中的524~532 nm。可以得出结论,当像源的光谱范围在524~540 nm之间时,沿 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 内任意角度方向入射,衍射的光谱范围相同,等于像源的光谱范围,从而在给定入射角度范围内获得一致的衍射光谱范围。

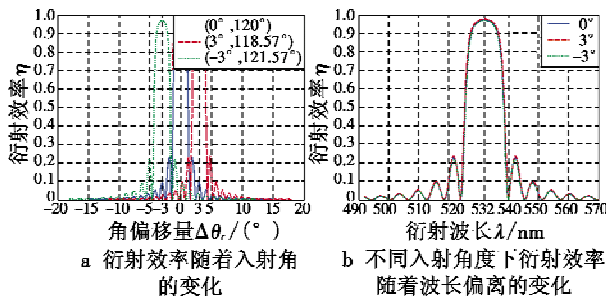


图6 三次曝光体全息光栅的衍射特性

Fig. 6 Diffraction properties of volume holographic grating based on three-step exposure

3 结论

对波导体全息光栅布拉格衍射波长随入射角度的变化进行了分析,针对波导体全息光栅在不同入射角度下衍射光谱的偏移,提出了两种减小衍射光谱偏移的方法,结果表明,选择合适的体全息光栅栅矢量倾斜角和像源光轴相对于体全息光栅的倾斜角可以有效地减小衍射光谱的偏移。为了使体全息光栅在给定入射角度范围内具有相同的衍射光谱范围,通过三次曝光给出了一种体全息光栅的设计方案。通过仿真计算可知,该体全息光栅在设计的角度范围及像源光谱范围,各入射角度下的衍射光谱范围相同,提高了体全息

光栅在不同入射角度下衍射光谱范围的一致性,可应用于全息波导平显、全息波导头显等波导显示领域。

参考文献

- [1] UPATNIEKS J. Edge-illuminated holograms[J]. Applied Optics, 1992, 31(8):1048-1052.
- [2] HUANG Q, GILBERT J A. Diffraction properties of substrate of guided-wave holograms[J]. Optical Engineering, 1995, 34(10):2891-2899.
- [3] PUTILIN A, GUSTOMIASOV I. Application of holographic elements in displays and planar illuminators[C]//SPIE, 2007, 6637:66370N1-66370N7.
- [4] JARVENPAA T, AYRAS P. Highly integrated near-to-eye display and gaze tracker[C]//SPIE, 2010, 7723:77230Y1-77230Y6.
- [5] CAMERON A. The application of holographic optical waveguide technology to Q-sight™ family of helmet mounted displays[C]//SPIE, 2009, 7326:73260H1-73260H11.
- [6] MUKAWA H, AKUTSU K, MATSUMURA I, et al. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection hologram[J]. Journal of the Society for Information Display, 2009, 17(3):185-193.
- [7] YAN Z J, LI W Q, ZHOU Y J, et al. Acceptable angle analysis of the planar wave-guided volume hologram[J]. Optics Communications, 2012, 285(13/14):2980-2985.
- [8] KOGELNIK H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. The Bell System Technical Journal, 1969, 48(9):2909-2947.
- [9] 刘英,蔡迪,陶世荃. 体全息光栅偏移布拉格角读出时衍射角的测定[J]. 激光杂志, 2007, 28(1):47-49. (LIU Y, CAI D, TAO S Q. Experimental determination of the diffraction angle of volume holographic gratings under off-bragg condition[J]. Laser Journal, 2007, 28(1):47-49.)
- [10] MOK F H, BURR G W, PSALTIS D. System metric for holographic memory systems[J]. Optics Letters, 1996, 21(12):896-898.

(上接第79页)

Proceedings of Americas Display Engineering and Applications Conference, 2006:23-26.

- [8] LEE Y B, BAILEY C B, LU H, et al. Analysis of the thermal mechanical effects on packaging process of performance enhanced AMLCS's and the optical performance of the display[C]//Proceedings of Electronics System Integration Technology Conference, 2006:5-7.
- [9] FENG Q B, HUA Y K, LÜ G Q, et al. Thermal stress analysis of laminated LCDs for aircraft cockpits[C]//Proceedings of Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, 2012:25-27.

- [10] 陈金玉,杨来侠. 基于 ANSYS WORKBENCH 手机外壳有限元网格划分研究[J]. 现代制造业技术与装备, 2008(1):58-60. (CHEN J Y, YANG L X. The research on finite element mesh for cellphone shell based on ANSYS WORKBENCH[J]. Journal of Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2008(1):58-60.)
- [11] 慕灿. 复杂结构 UG NX 模型导入 ANSYS Workbench 的方法研究[J]. 四川理工学院学报:自然科学版, 2013, 26(4):44-46. (MU C. Discussion on importing complex configuration UG NX model into ANSYS Workbench[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering: Natural Science Edition, 2013, 26(4):44-46.)