

光学学报

基于带宽匹配的复用体全息光栅设计

冯奇斌¹, 蔡佳豪², 郭裕嵩², 郭敏², 王梓¹, 吕国强^{2*}

¹合肥工业大学特种显示与成像技术安徽省技术创新中心, 特种显示技术国家工程实验室, 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;

²合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 体全息光栅作为全息波导显示器的出/入耦合元件,其性能严重影响波导系统的视场。因其角度选择性,当光束偏离布拉格角入射体全息光栅时,其衍射光角度会产生较大的偏移,使得其与出耦合光栅的响应带宽不匹配,限制了波导系统的视场。首先基于 Kogelnik 理论对波导系统中体全息光栅的带宽匹配进行了分析。为了扩展波导系统的视场,提出了一种复用体全息光栅的设计方法。该设计旨在扩展出耦合光栅的响应带宽并同时收缩入耦合光栅的衍射光角度,使得出/入耦合光栅的带宽相匹配。仿真结果表明:采用本文设计的复用体全息光栅后,波导系统的视场能达到 22.9° 。本文设计的复用体全息光栅制备简单,可以有效拓展波导系统的视场。

关键词 体全息光栅; 响应带宽; 波导; 复用

中图分类号 TN27 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231160

1 引言

近几年,近眼显示技术逐步应用在学习生活中的各个领域,比如医疗、生活娱乐^[1]。现今在近眼显示波导系统中可供选择的耦合元件种类有很多,如棱镜^[2]、自由曲面元件^[3]、浮雕光栅^[4-5]、全息光学元件^[6]等。全息波导系统凭借着其体积小、光路简单等特点成为近眼显示的主流光学系统。全息波导系统使用体全息光栅(VHG)作为出/入耦合元件,其极易实现微型化和透明显示^[7-8],这使得VHG在近眼显示领域具有巨大的潜力。然而体全息光栅过度的角度依赖性限制了其响应带宽,从而限制了波导系统的视场(FOV)。针对全息波导系统的视场扩展,Shen等^[9]提出了一种多层VHG结构,对其参数进行优化,可以在不增加成本和额外的光学设计的情况下有效扩大视场,并建立一个严格的仿真模型来验证多层结构的可行性。鲁婷婷等^[10]以不对称倾斜记录为出发点,设计并制备了大角带宽高衍射效率的体全息光栅,制备的体全息光栅的角带宽达到 $\pm 14^\circ$,从而扩大了波导的FOV。王闯等^[11]提出了一种可有效扩展衍射响应带宽的双重体光栅波导结构,通过变角度分次曝光法完成光栅制备,并搭建全息波导显示系统,实现了 40.3° 的对角线视场。

目前对于波导系统视场的研究,很多是通过扩展体全息光栅的入射角响应带宽来实现的。在设计体全

息光栅时,大多是基于中心光线进行设计。但在波导显示系统中,准直系统将图像源上的位置信息转化为角度信息,因此入射到体全息光栅的光束是具有一定角度范围的($\Delta\theta$)。基于 Kogelnik 理论可知,其衍射光束的角度变化范围 $\Delta\theta'$ 远大于 $\Delta\theta$ 。由于入耦合光栅的衍射光束是出耦合光栅的入射光束, $\Delta\theta$ 和 $\Delta\theta'$ 之间的不匹配将造成出耦合光栅不能完全接收衍射光束中所有角度信息,丢失传输图像信息。本文提出了一种复用体全息光栅的设计方法,通过多角度复用的方式增大出耦合光栅的响应带宽,同时减小入耦合光栅的衍射角度偏移范围,使其带宽尽量匹配,以便能够接收到足够多的图像信息,增大波导的视场。

2 波导显示系统中体全息光栅带宽分析

波导显示系统主要由图像源、准直系统、波导和出/入耦合体全息光栅组成。图1是中心光束的传播情况,平行光经入耦合体全息光栅耦合进波导,满足全反射条件后在波导内传输,遇到出耦合体全息光栅后改变传输方向进入人眼。

图2为包括完整的准直光束的全息波导显示系统。可以看出,边缘光束具有一定的角度和光束宽度,分别以 $\pm\theta/2$ 角入射进波导。根据下式^[12]计算可得经过入耦合体全息光栅后衍射光角度的偏移范围。

收稿日期: 2023-06-20; 修回日期: 2023-07-16; 录用日期: 2023-07-26; 网络首发日期: 2023-08-02

基金项目: 安徽省科技重大专项(202203a05020028)

通信作者: *guoqianglv@hfut.edu.cn

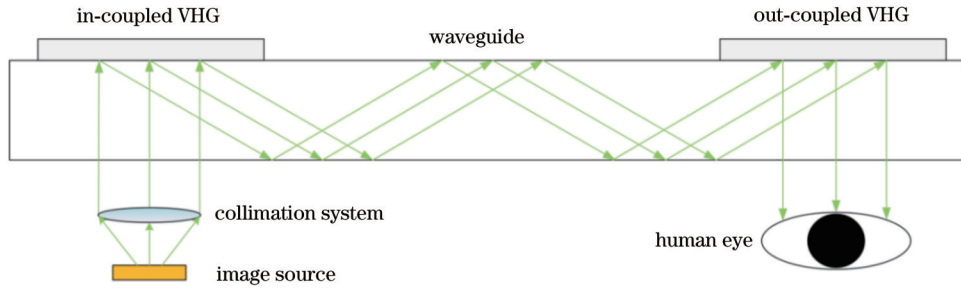


图 1 全息波导显示系统中中心光束的传播示意图

Fig. 1 Propagation diagram of central beam in holographic waveguide display system

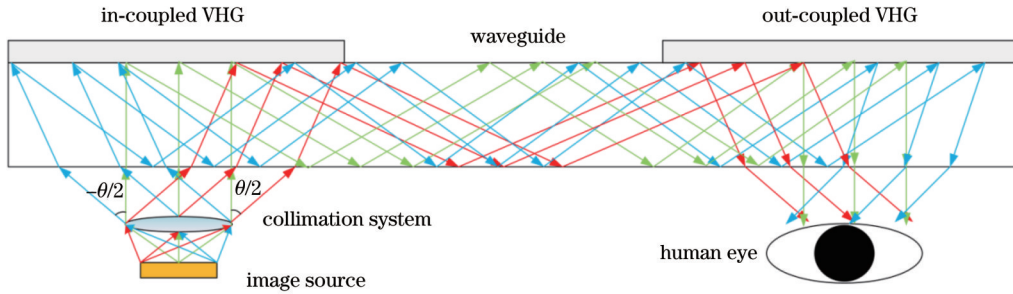


图 2 全息波导显示系统中全角度范围准直光束的传播示意图

Fig. 2 Propagation diagram of full angle range collimated beam in holographic waveguide display system

$$\sin \theta_s = \sin \theta_r - |K| \cdot \sin \varphi / \beta, \quad (1)$$

式中： θ_r 和 θ_s 分别为光线入射角与其对应的衍射角； $|K| = 2\pi/\Lambda$ ， K 为体光栅的光栅矢量， Λ 为光栅周期， φ 为光栅倾斜角， Λ 和 φ 与光栅的物光和参考光制备角度相关； $\beta = 2\pi n/\lambda$ ，为光波在光栅介质中的传播常量，其中 n 为光栅介质的平均折射率， λ 为光栅的制备波长。以制备角度 0° 和 60° 的单色 VHG 为例，当光线入射角 θ_r 偏转 $\pm 5^\circ$ 时，其衍射光角度 θ_s 范围为 $51.2^\circ \sim 72.4^\circ$ ，这角度就是出耦合光栅的入射光角度，与 60° 的制备角度发生较大偏移，过大的角度偏移与出耦合光栅的响应带宽不匹配，使得波导能显示的画面有限。根据以上分析可知，出/入耦合光栅带宽不匹配现象严重限制了波导系统的 FOV。

3 基于带宽匹配的复用体全息光栅设计

为了解决全息波导显示系统中出/入耦合光栅带宽不匹配的问题，本文提出了一种复用体全息光栅的设计方法，并根据多路耦合波理论对该光栅进行计算验证，最终增大了出耦合光栅的响应带宽，同时收缩了衍射光角度 θ_s ，从而实现波导系统视场的扩展。

本文设计了两次复用的光栅。在设计时，须保证两次复用所设计的光栅的入射响应带宽不存在间隔，否则会造成图像信息的缺失；其次需保证复用的两个光栅的横向周期保持一致，以避免入射响应带宽发生部分重叠时引起的光栅间的串扰^[13]。

仍以制备角度为 0° 和 60° 的光栅为例。基于

Kogelnik 理论^[12]，光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 、折射率调制度 Δn 为 0.06 的体全息光栅衍射效率随光束角度变化的带宽曲线如图 3 所示。

由图 3(a) 可知，该条件下制备的 VHG 入射角响应带宽为 $-3.6^\circ \sim 4.1^\circ$ ，其耦合出的衍射光角度范围如图 3(b) 实线所示，为 $52.8^\circ \sim 69.4^\circ$ ，而出耦合光栅的响应带宽如图 3(b) 虚线所示，为 $55.9^\circ \sim 63.6^\circ$ 左右，这就导致能够被其所响应的角度信息只有入耦合光栅所衍射光束的一半左右，尤其在 $63.6^\circ \sim 69.4^\circ$ 这段损失角度信息较多，造成图像显示不完全。

为解决此问题，本文对光栅进行两次复用。为了保证响应带宽曲线的均匀性，两组光栅平分折射率调制度 Δn ，即 $\Delta n_1 = \Delta n_2 = 0.03$ 。基于 Kogelnik 理论，当折射率调制度降低时，其光栅的衍射效率和响应带宽也会相应的下降，根据计算可知，第一组光栅的响应带宽下降到 $57^\circ \sim 62.6^\circ$ 。由前面的分析可知，大于 60° 的角度信息损失大约占总视场的 $1/3$ ，所以对大于 60° 的角度进行复用，在折射率调制度相同、物光和参考光角度相近的情况下，体全息光栅的响应带宽也大致相同，即为 5.6° 。为了将大于 60° 的角度信息全部耦出，根据多路耦合波理论，复用光栅的带宽扩展可以以类似叠加的方式复合在一起，所以将第二组光栅 5.6° 的响应带宽全部复合在第一组光栅的带宽边缘，即大致响应带宽为 $62.6^\circ \sim 68.2^\circ$ ，考虑到第一组光栅的制备角度不完全在响应带宽的中心，即偏移了 0.2° ，因此设定第二组光栅的物光角度 $\theta_2' = 65.6^\circ$ 。在此条件下，为了避免两光栅之间的串扰，设定两组光栅具有相同的横向

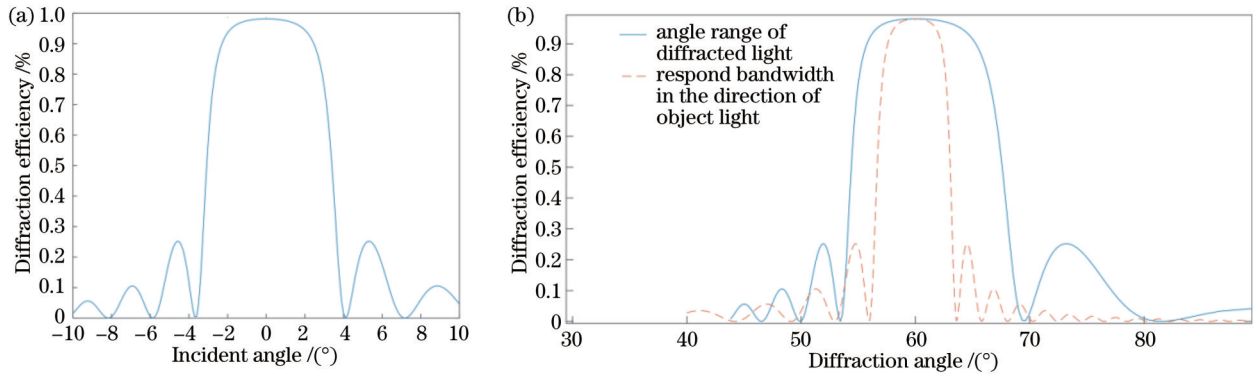


图 3 体全息光栅衍射效率随角度变化曲线。(a)入耦合光栅响应带宽曲线;(b)入耦合光栅衍射光角度与出耦合光栅响应带宽曲线
Fig. 3 Curves of volume holographic grating diffraction efficiency changing with angle. (a) In-coupled grating response bandwidth curve; (b) in-coupled grating diffraction light angle and out-coupled grating response bandwidth curves

周期。根据下式计算可得参考光角度 θ_1' 。

$$n_2 \sin(\theta_2) - n_1 \sin(\theta_1) = \frac{M\lambda}{\Lambda}, \quad (2)$$

$$\Lambda_x = \frac{\Lambda}{\sin \varphi}, \quad (3)$$

$$n_2 \sin(\theta_2') - n_1 \sin(\theta_1') = \frac{M\lambda}{\Lambda_x \sin(\varphi')}, \quad (4)$$

式中: $n_1 = 1$ 为空气折射率; $n_2 = 1.52$ 为波导介质折射率; θ_1 和 θ_2 分别为制备第一组光栅的参考光和物光角度; θ_1' 和 θ_2' 分别为制备第二组光栅的参考光和物光角度; M 为衍射级次; 计算得到光栅周期 $\Lambda = 0.404 \mu\text{m}$; Λ_x 为光栅横向周期的大小; $\varphi = \theta_2/2 -$

$\theta_1/2$, φ 为光栅倾斜角, 则 $\Lambda_x = 0.808 \mu\text{m}$ 。再将 Λ_x 和 θ_2' 代入式 (4) 计算可得第二组光栅的参考光角度 $\theta_1' = 3.9^\circ$ 。

此复用光栅的角度与效率曲线可根据多路耦合波理论^[14]得出。

$$\eta = \sum \eta_i = \sum \frac{c_{Si}}{c_R} S_{i0} S_{i0}^*, \quad (5)$$

式中: η_i 为每组光栅对应角度的效率值; c_{Si} 和 c_R 为两组光栅有效波各自的方向余弦, 其值与对应光栅的制备角度、入射光波长和波导折射率 n_2 相关; S_{i0} 为第 i 组光栅衍射光在入射光方向处的衍射光分量值; S_{i0}^* 为其对应的共轭。则复用光栅相应的计算结果如图 4 所示。

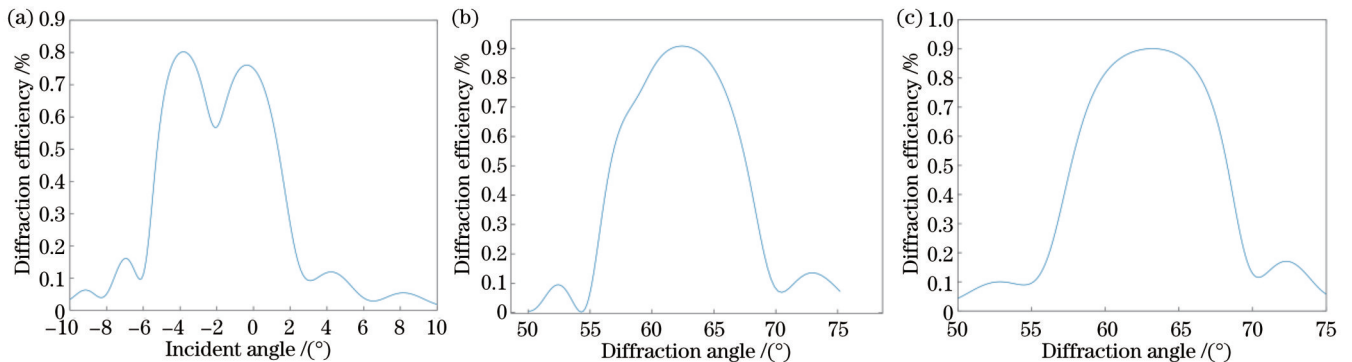


图 4 二次复用光栅的角度与效率曲线图。(a)入耦合光栅响应带宽曲线;(b)入耦合光栅衍射光角度曲线;(c)出耦合光栅响应带宽曲线
Fig. 4 Angle and efficiency curve for secondary multiplexed gratings. (a) In-coupled grating response bandwidth curve; (b) in-coupled grating diffraction light angle curve; (c) out-coupled grating response bandwidth curve

复用光栅的入射光响应带宽如图 4(a) 所示, 带宽与单光栅类似, 但角度出现不对称的情况, 可能会造成耦合入波导的图像信息不均匀或边缘信息缺失。同时, 衍射效率也有所下降, 这是复用光栅难以避免的问题, 但是增大 VHG 本身的折射率调制度能缓解此问题的影响。图 4(b) 为衍射光对应的效率曲线, 由图中可知, 衍射角范围大致为 $54.5^\circ \sim 70.1^\circ$, 根据此设计, 使小于 60° 能被光栅所衍射的角度信息发生了偏移, 总

体使得此角度范围得到了收缩, 且出耦合光栅的响应带宽也得到了扩展如图 4(c) 所示, 能得出更多的角度信息。但由于边缘角度的衍射效率较低, 实际成像时边缘图像信息会产生较大损失, 成像效率较低。

4 全息波导系统的仿真及优化

为对上述设计的复用体全息光栅进行验证, 建立了完整的波导模型, 并对其各种参数进行设置。首先

需要对图像源和准直系统进行设计,图像源尺寸与准直系统参数由入耦合所需的角度信息所决定,表示为

$$\tan(\theta/2) = x/2f, \quad (6)$$

式中: θ 为图2中图像源的发散角; x 为图像源的尺寸; f 为准直系统的焦距。设定图像源尺寸为 $6.5 \text{ mm} \times 3.9 \text{ mm}$,准直系统焦距 $f = 15 \text{ mm}$,则此系统出射的光

束角度为 $24.5^\circ \times 14.8^\circ$ 。

波导仿真模型如图5所示,包括图像源、准直系统、波导、人眼成像系统、出/入耦合光栅,光源的入射光波长与光栅的制备波长相匹配,定义为 532 nm ,设为TE偏振光。人眼模型部分采用准直透镜和探测器组合的方式进行模拟。

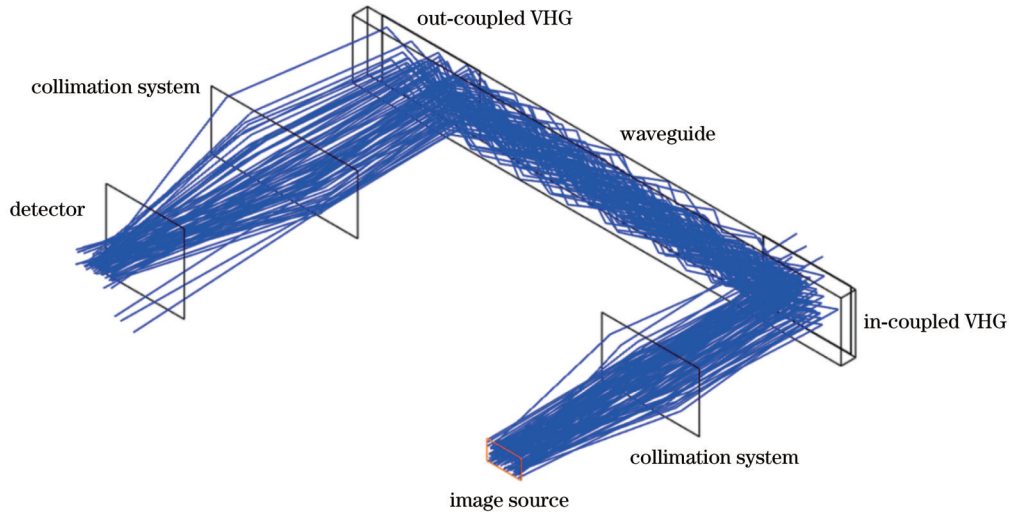


图5 波导仿真模型

Fig. 5 Waveguide simulation model

根据此模型,先对制备角度为 0° 和 60° 、折射率调制为 0.06 的单光栅进行图像模拟仿真,仿真结果如图6所示。

图6(a)为图像源,传输 10×6 的网格图像,图6(b)为图像源经准直系统后通过波导进入耦合光栅衍射所得到的图像,可以看到该光栅响应带宽的限制只将图像源的一部分图像信息衍射出去,且在边缘发生了一些畸变,这是由于其角锥衍射造成的影响。当入射光线在空间中以倾斜角度入射体全息光栅后,光栅的周

期性结构导致了不同入射角度的光线经过衍射后以不同的角度散射出去,从而产生这样的现象,体现在数据上就是将入耦合光栅的响应带宽接收到的角度信息转化为一个更大的角度衍射出去,导致其与出耦合光栅的响应带宽不匹配,使得能被出耦合光栅所衍射的图像信息减少。如图6(c)所示,图像信息显示不完整,其视场由式(6)计算可得 $6.5^\circ \times 14.8^\circ$,则对角线视场可达到 16.1° 。将所设计的复用光栅的参数代入同样波导模型中进行图像模拟仿真,得到结果如图7所示。

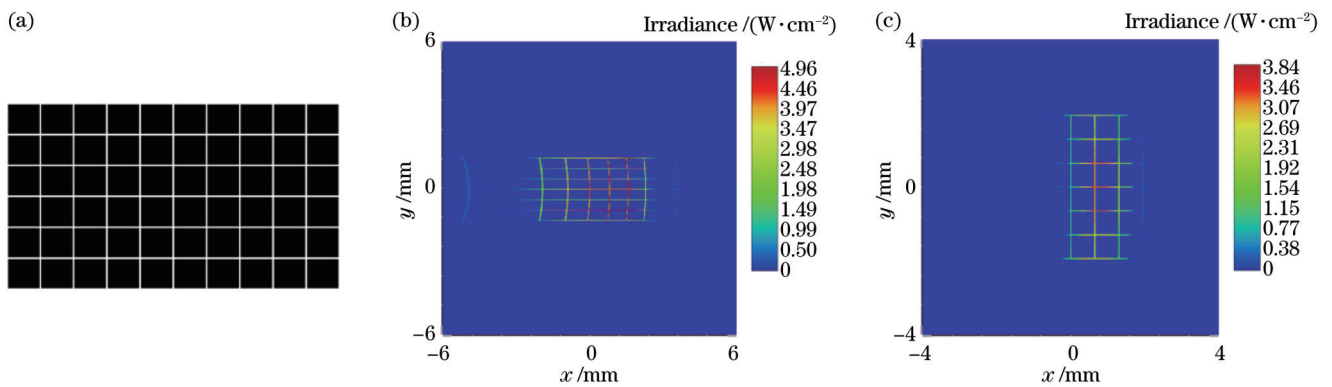


图6 体全息波导图像仿真。(a)图像源;(b)入耦合光栅衍射图像;(c)波导图像仿真

Fig. 6 Simulation of volume holographic waveguide image. (a) Image source; (b) in-coupled grating diffraction image; (c) waveguide image simulation

图7(a)为图像源经准直系统后通过波导经复用入耦合光栅衍射所得到的图像,同样衍射出的7格图

案尺寸由图6(b)的 6.1 mm 减少到图7(a)的 4.9 mm ,可以看出,复用光栅衍射角度偏移范围有所收缩。图

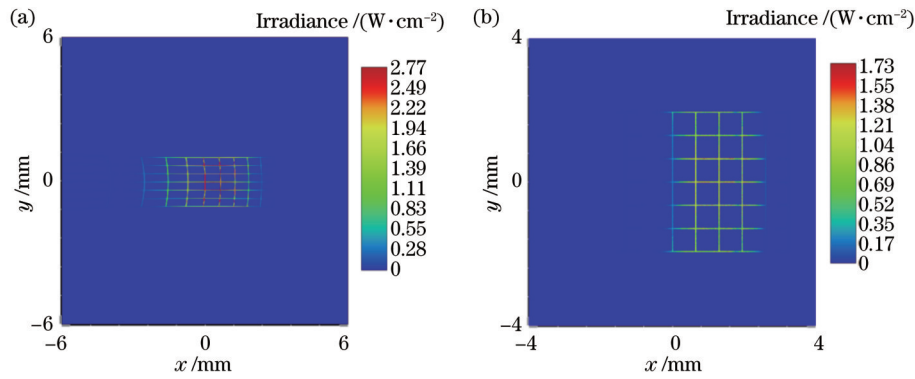


图 7 二次复用光栅波导图像仿真。(a)入耦合光栅衍射图像;(b)波导图像仿真

Fig. 7 Simulation of secondary multiplexed grating waveguide images. (a) In-coupled grating diffraction image; (b) waveguide image simulation

7(b)为人眼接收到的图像,图像信息与单光栅相比显示更多,按照我们设计的第二组光栅补充了一些右边所丢失的视场,其视场计算可得为 $11.4^\circ \times 14.8^\circ$,则对角线视场可达到 18.7° ,基本将入耦合光栅所响应的大部分信息显示出来,但视场还是不够大。

为了获得更大的FOV,在二次复用的基础上进行

三次复用优化设计,同时对入耦合光栅的响应带宽进行扩展。为了使光栅的响应带宽对称分布,继续二次复用的设计方法,定义第三组光栅的物光角度 $\theta_2''=54^\circ$,则根据式(4)计算可得参考光角度 θ_1'' 为 -5° 。该光栅的角度与效率曲线如图8所示。

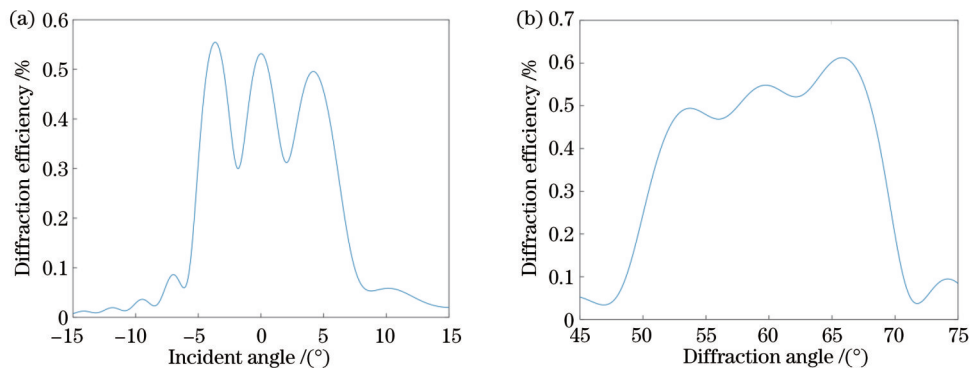


图 8 三次复用光栅的角度与效率曲线图。(a)入耦合光栅响应带宽曲线;(b)出耦合光栅响应带宽曲线。

Fig. 8 Angle and efficiency curve of the triple multiplexed grating. (a) In-coupled grating response bandwidth curve; (b) out-coupled grating response bandwidth curve

如图8(a)所示,三次复用光栅的入射光响应带宽提高到 13° ,且出耦合光栅的响应带宽也得到了扩展如图8(b)所示,能耦出更多的角度信息。将所设计的三次复用光栅的参数代入同样波导模型中进行图像模拟仿真,图像仿真结果如图9所示。

图9为人眼接收到的图像,视场从二次复用的 $11.4^\circ \times 14.8^\circ$ 提升到现在的 $17.5^\circ \times 14.8^\circ$,则对角线视场能达到 22.9° 。该结构能够有效扩大全息波导系统的FOV,满足设计要求。

5 结 论

本文首先基于Kogelnik理论分析了波导系统中出/入耦合光栅存在的带宽不匹配问题,发现限制全息波导系统视场的因素不仅仅在于体全息光栅本身的响应带宽,其衍射光角度的偏移使得出/入耦合光栅带宽

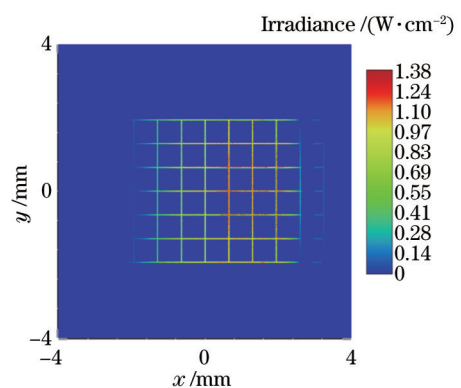


图 9 三次复用光栅波导图像仿真

Fig. 9 Simulation of triple multiplexed grating waveguide image
不匹配,对波导系统的视场也有很大的影响。因此提出了一种复用体全息光栅的设计方法,对其衍射角度

和出耦合光栅响应带宽进行控制,并基于多路耦合波理论对复用的两次光栅进行计算验证,使出耦合光栅的响应带宽得到扩展,并同时实现对其衍射角度的收缩。并进行了图像仿真及三次复用的优化设计,将全息波导系统的对角线视场提高到 22.9° ,通过更多次的复用设计能进一步地扩大波导系统的 FOV,但相应的衍射效率也会进一步下降。本文设计的复用体全息光栅制备简单,能在有限的折射率调制度的情况下扩展波导系统的视场。

参 考 文 献

- [1] Koulieris G A, Akşit K, Stengel M, et al. Near-eye display and tracking technologies for virtual and augmented reality[J]. Computer Graphics Forum, 2019, 38(2): 493-519.
- [2] Wu Z M, Liu J A, Wang Y T. A high-efficiency holographic waveguide display system with a prism in-coupler[J]. Journal of the Society for Information Display, 2013, 21(12): 524-528.
- [3] 操超, 廖胜, 廖志远, 等. 基于自由曲面的大视场离轴反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0808001.
Cao C, Liao S, Liao Z Y, et al. Design of off-axis reflective optical system with large field-of-view based on freeform surfaces [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0808001.
- [4] 郑志忠, 杨忠, 修连存. 高衍射效率短波红外凸面闪耀光栅的研制与应用[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1205002.
Zheng Z Z, Yang Z, Xiu L C. Development and application of shortwave infrared convex blazed grating with high diffraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1205002.
- [5] 刘全, 吴建宏, 郭培亮, 等. 高衍射效率凸面闪耀光栅的研制[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0313001.
Liu Q, Wu J H, Guo P L, et al. Fabrication of convex blazed grating with high diffraction efficiency[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0313001.
- [6] Maimone A, Wang J R. Holographic optics for thin and lightweight virtual reality[J]. ACM Transactions on Graphics, 39(4): 67.
- [7] Murakami E, Oguro Y, Sakamoto Y. Study on compact head-mounted display system using electro-holography for augmented reality[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2017, E100.C(11): 965-971.
- [8] Li G, Lee D, Jeong Y, et al. Holographic display for see-through augmented reality using mirror-lens holographic optical element[J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2486-2489.
- [9] Shen Z W, Zhang Y N, Weng Y S, et al. Characterization and optimization of field of view in a holographic waveguide display [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 7000911.
- [10] 鲁婷婷, 冯奇斌, 王梓, 等. 大角带宽高衍射效率体全息光栅的设计和制备[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0205001.
Lu T T, Feng Q B, Wang Z, et al. Design and fabrication of volume holographic gratings with large angular bandwidth and high diffraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0205001.
- [11] 王闯, 沈忠文, 翁一士, 等. 基于双重体光栅的波导显示系统视场扩展研究[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0723001.
Wang C, Shen Z W, Weng Y S, et al. Field-of-view expansion of waveguide display system with double-layer volume grating [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0723001.
- [12] 陶世荃, 江青竹, 万红玉. 光学体全息技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 19-23.
Tao S Q, Jiang Q Z, Wan H Y. Optical volume holography technology and its application[M]. Beijing: Science Press, 2013: 19-23.
- [13] 刘皓天. 偏振体光栅全息波导显示的成像仿真研究[D]. 南京: 东南大学, 2021: 55-56.
Liu H T. Imaging simulation of holographic waveguide display with polarizer grating[D]. Nanjing: Southeast University, 2021: 55-56.
- [14] Ingersoll G B, Leger J R. Spectral interference in multiplexed volume Bragg gratings: theoretical calculations and experimental verification[J]. Applied Optics, 2014, 53(24): 5477-5485.

Bandwidth Matching-Based Multiplexed Volume Holographic Grating

Feng Qibin¹, Cai Jiahao², Guo Yusong², Guo Min², Wang Zi¹, Lü Guoqiang^{2*}

¹Special Display and Imaging Technology Innovation Center of Anhui Province, National Engineering Laboratory of Special Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

²School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

Abstract

Objective The performance of a volume holographic grating as an incoupling/outcoupling element seriously affects the field of view (FOV) of a waveguide system. Many studies try to extend the incident angle response bandwidth of the volume holographic gratings to increase FOV. Most volume holographic gratings are designed based on the center ray. However, in a waveguide system, the collimation system converts the position information on the image source into angular information, which makes the beam incident to the volume holographic grating within a certain angle range ($\Delta\theta$). Based on the Kogelnik theory, the angular range of the diffracted beam $\Delta\theta'$ is much larger than $\Delta\theta$. Since the diffracted beam of the incoupling grating is the incident beam of the outcoupling grating, the mismatch between $\Delta\theta$ and $\Delta\theta'$ will make the outcoupling grating cannot fully receive all the angular information in the diffracted beam, causing insufficient transmitted image information. We propose a design method of multiplexed volume holographic gratings. The response

bandwidth of the outcoupling grating is increased through multi-time multiplexing, while the diffraction angle offset range of the incoupling grating is reduced to match its bandwidth as much as possible, which can guarantee that enough image information can be received to increase the FOV of a waveguide system.

Methods The analysis reveals that the factors limiting the FOV of the waveguide system include not only the response bandwidth of the volume holographic grating itself but also the bandwidth mismatch between incoupling grating and outcoupling grating. Therefore, a design method of multiplexed volume holographic gratings is proposed. The object and reference light preparation angles of a single grating are determined according to the total reflection condition of the waveguide. The diffraction efficiency corresponding to each of its angles is calculated, as well as the response bandwidth of the incoupling grating, the diffracted light angle of the incoupling grating, and the response bandwidth of the outcoupling grating. The diffracted light angle range of the incoupling grating is revealed to be much larger than the response bandwidth of the outcoupling grating, with a bandwidth mismatch. According to the multiplexed coupled wave theory, the bandwidth extension of the multiplexed gratings can be compounded together in a similar way as superposition. Based on the angular range of the bandwidth mismatch occurrence, the response bandwidth of the outcoupling grating is expanded by the multiplexed method, and the diffracted light angle of the incoupling grating is contracted at the same time. This makes the incoupling/outcoupling grating bandwidths match as much as possible, compensating for the lack of some image information when the waveguide system is imaged.

Results and Discussions Firstly, the diffraction efficiency corresponding to each of its angles is calculated based on the parameters of the designed single grating (Fig. 3). Meanwhile, image simulation is performed by simulation software (Fig. 6) and the diagonal FOV of the waveguide system is 16.1° . The horizontal FOV is too small, resulting in the inability to fully couple out the image coupled into the waveguide. Therefore, the multiplexed grating angle is designed (Fig. 4) to match the incoupling/outcoupling grating response bandwidths. The FOV is further extended to 18.7° (Fig. 7). The angular information of the coupled-in waveguide should be increased to further increase the FOV. Triple multiplexing is performed based on the secondary multiplexing, and the response bandwidth of the incoupling grating is extended simultaneously (Fig. 8). The simulation results show that the diagonal FOV can reach 22.9° (Fig. 9). The multiplexed volume holographic grating designed by this method is simple to prepare and can expand the FOV of the waveguide system.

Conclusions We first analyze the bandwidth mismatch in the incoupling/outcoupling gratings of the waveguide system. The factors limiting the FOV of the holographic waveguide system are not only the response bandwidth of the volume holographic grating itself but also the bandwidth mismatch between the incoupling grating and outcoupling grating. Therefore, a design method of multiplexed volume holographic grating is proposed to control its diffraction angle and the response bandwidth of the outcoupling grating. Based on the multiplexed coupled wave theory, the secondary multiplexed grating is first designed. Additionally, the response bandwidth of the outcoupling grating is expanded and the contraction of its diffraction angle is realized at the same time. The image simulation and the optimized design of triple multiplexing are further carried out, whose diagonal FOV of the holographic waveguide system is improved to 22.9° . The FOV of the waveguide system can be further enlarged by more times of multiplexed design. The designed multiplexed holographic grating is simple to prepare and can extend the FOV of the waveguide system with limited refractive index modulation.

Key words volume holographic grating; response bandwidth; waveguide; multiplexed