

文章编号 2097-1842(2023)05-1157-11

等周期变倾角干涉条纹复用扩展增强现实耦合 元件体光栅角度带宽

彭灿福^{1,2}, 李文昊¹, 张伟^{1*}, 陈星硕^{1,2}, 刘睿^{1,2}, 张婧英^{1,2}, 李文龙^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了提高光波导近眼显示成像系统的视场角, 本文提出了一种等周期变倾角干涉条纹复用方法, 用于扩展增强现实眼镜耦合元件体光栅的角度带宽。该方法通过复用等周期变倾角干涉条纹满足了不同入射角的布拉格条件, 并且消除了体光栅周期变化对入射光衍射角度的影响, 从而提升耦合元件体光栅的角度响应范围, 降低光栅衍射引入的杂散光。利用严格耦合波理论对复用三幅等周期变倾角干涉条纹的体光栅进行模拟, 在波长为 530 nm 的 TE 和 TM 偏振态下, 复用后的体光栅角度带宽分别为 3.6° 和 3.3°, 与单幅干涉条纹体光栅相比, 角度带宽扩展了 1 倍。该方法有望打破体光栅角度带宽受光栅材料的限制, 用于扩展近眼显示成像系统的视场角, 实现轻量化、高效率、大视场、低杂散光的增强现实眼镜。

关键词: 增强现实; 近眼显示; 体光栅复用; 角度带宽扩展

中图分类号: O436 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0050

收稿日期: 2023-03-27; 修订日期: 2023-04-21

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2022YFF1202002); 国家自然科学基金项目(No. 62005270); 中国科学院战略性先导科技专项(C类)资助(No. XDC04030100); 吉林省科技发展计划项目(No. 20210201140GX, No. 20210402056GH); 吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金项目(No. 2022SYHZ0024)
Supported by National Key R & D Program of China (No. 2022YFF1202002); National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 62005270); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDC04030100); Jinlin Province Science and Technology Development Plan (No. 20210201140GX, No. 20210402056GH); Special Fund Project of High-tech Industrialization of Science and Technology Cooperation between Jilin Province and Chinese Academy of Sciences (No. 2022SYHZ0024)

Expanding the angular bandwidth of augmented reality coupling element volume holographic grating by multiplexing equal-period and variable-inclination-angle interference fringes

PENG Can-fu^{1,2}, LI Wen-hao¹, ZHANG Wei^{1*}, CHEN Xing-shuo^{1,2}, LIU Rui^{1,2},
ZHANG Jing-ying^{1,2}, LI Wen-long^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhangwei1990@ciomp.ac.cn*

Abstract: To improve the field of view of the near-to-eye display imaging system by using the optical waveguide scheme, we propose a method of multiplexing interference fringes with equal periods and variable inclination angles to expand the angular bandwidth of the volume holographic grating for augmented reality glasses coupling element. With this method, the range of incident angles after the expansion mathes the Bragg condition, and the influence of the periodic change on the diffraction angle of the incident light is eliminated, thereby improving the angular response range of the coupling element volume holographic grating and reducing the stray light introduced by grating diffraction. The rigorous coupled wave analysis theory is used to simulate the volume holographic grating multiplexing three interference fringes with equal period and variable inclination angles. Under the TE and TM polarization states at the wavelength of 530 nm, the angular bandwidth of the multiplexed volume holographic grating is 3.6° and 3.3°, respectively. The angular bandwidth of the multiplexed volume holographic grating is twice as large as that of the volume holographic grating recorded with a single interference fringe. This method is expected to break the limitation of the volume holographic grating material on the angular bandwidth of the grating, and can be used to expand the field of view of the near-to-eye display imaging system to achieve lightweight, high-efficiency, large-field-of-view, and low-stray-light augmented reality glasses.

Key words: augmented reality; near-to-eye display; volume holographic grating multiplexing; angular bandwidth expansion

1 引言

增强现实 (Augment Reality, AR) 技术是下一代显示技术的发展方向, 它通过实时叠加声音、视频、图形等信息来增强现实世界, 在军事、医疗、教育以及工业生产领域有广泛的应用^[1-5]。增强现实技术用于军事领域时, 可协助飞行员在飞行任务中完成数据显示、目标对准等任务, 是未来信息化战场的重要研究对象^[6-8]。在外科手术中, 增强现实技术结合三维 CT 建模技术, 可以为

即将进行手术的病灶进行精确 3D 重构, 让医生提前对患者的身体进行了解, 并且实时协同沟通, 降低手术的风险。在数字信息时代, 增强现实技术可以将各种抽象模型以三维立体的形式展现给学生, 方便学生理解^[9]。工业生产在智能制造的背景下, 可以利用增强现实技术提供远程协助、远程维修等项目支持, 缩短工期, 提升效率^[10]。增强现实技术具有极强的视觉交互能力, 通过将数字图像与现实环境叠加, 提升人们对于周围可视环境的感知, 其发展趋势是轻量化、集成化、高衍射效率、大视场、低杂散光等^[11-12]。

在实现增强现实技术中,光波导增强现实眼镜因系统结构紧凑,对外界环境光线可视性好等特点,受到研究人员的广泛关注。目前光波导增强现实眼镜的光信息耦合方式包括几何光波导和衍射光波导。几何光波导主要以部分反射微镜阵列作为耦合元件,衍射光波导主要采用表面浮雕光栅(Surface Relief Grating, SRG)或者体全息光栅(Volume Holographic Grating, VHG)作为耦合元件。相比于几何光波导,衍射光波导在抑制波导内杂光、减少鬼影、扩大眼睛视窗(eye box)、提升出瞳均匀性等方面具有显著优势。例如Lumus公司采用几何波导^[13],分别以棱镜和半透半反镜作为耦入耦出元件,光波导内存在多次全反射,会带来杂光,影响出瞳处的光强度及扩瞳效果。而Magic Leap公司采用表面浮雕光栅作为耦合元件^[14],研制的眼镜可以实现40°视场角。表面浮雕光栅结构的设计自由度高,易于调节光栅参数实现比几何光波导更好的出瞳扩展连续性。DigiLens公司采用体光栅作为耦合元件^[15],其光波导眼镜可以实现35°视场角,在满足布拉格条件下具有比表面浮雕光栅更高的衍射效率,易于实现更大面积的出瞳面光场均匀性,从而扩展出瞳,增大眼睛视窗。衍射光波导利用光栅元件调制出瞳处的衍射效率,易于实现出瞳面的扩展,衍射光波导是未来增强现实眼镜发展的主流趋势。

在衍射光波导中,表面浮雕光栅耦合元件的衍射级次多,会导致近眼显示系统存在成像亮度低、彩虹现象严重等问题。例如,微软公司研制的增强现实眼镜Hololens采用了表面浮雕光栅作为耦合元件^[16],其光栅的衍射级次多,导致视场内成像亮度分布不均匀,存在波长串扰和漏光现象,因此,在昏暗环境下表面浮雕光栅眼镜容易造成信息泄露。体光栅利用光致聚合物等光敏材料在不同光强照射下对内部折射率进行调制,形成周期性的折射率分布结构。在满足布拉格条件下,能够将设定波长及角度的光以非常高的效率耦入耦出光波导,且抑制多余级次衍射产生的杂光,已经成为衍射光波导方案中的研究热点^[17]。索尼公司开发了一款体光栅波导的增强现实眼镜^[18],具有极高的光耦合效率,出瞳面的成像亮度高,未出现重影现象。同时体光栅具有极强的波长选择性,对外界环境可视性良好,易于将耦入的图像信息与周围环境融合。

然而体光栅作为光波导耦合元件,由于布拉格条件角度选择性强,会存在体光栅角度带宽窄的问题,导致增强现实眼镜的近眼显示成像视场角小。国内外学者针对提升体光栅角度带宽提出了许多方法,例如东南大学的研究团队改进了光致聚合物新配方^[19],制备的光致聚合物材料折射率调制度为0.05,体光栅的角度带宽提升了0.43倍;长春理工大学团队通过在体光栅上叠加闪耀浮雕光栅结构^[20],研制的新型光栅角度带宽从2°提高到3.5°;北京理工大学团队在出瞳处采用复用变周期干涉条纹的体光栅作为耦出元件,以扩大波导显示系统的视场角^[21],但由于复用后体光栅表面周期不同导致光栅衍射角度发生变化,降低了衍射效率,增加了系统杂光。上述提升体光栅角度带宽的方法,受限于光致聚合物材料及光栅结构等因素,进一步提升体光栅的角度带宽存在瓶颈。

本文提出的体光栅复用方法,采用在一片体光栅中复用等周期变倾角的多幅干涉条纹,满足不同入射角下对应的布拉格条件,从而提升体光栅的角度带宽。文中分析了复用后体光栅的衍射特性,研究了复用不同倾角间隔的干涉条纹对体光栅角度带宽的影响规律以及折射率调制度对复用后体光栅衍射特性的影响,获得了复用三幅等周期变倾角干涉条纹的体光栅,在波长为530 nm的TE和TM偏振态下,以体光栅角度衍射特性曲线的半峰全宽(FWHM)作为角度带宽,分别为3.6°和3.3°。与记录单幅干涉条纹体光栅相比,角度带宽扩展了1倍。该方法有助于实现近眼显示成像视场角的扩展,并且降低光波导中的衍射杂散光。

2 复用体光栅结构及工作原理

图1(a)展示了增强现实光波导模块的基本结构,其中耦入耦出元件为反射型体光栅。物空间图像发出的光经过准直后入射至耦入体光栅,+1级衍射光在平板波导内发生全反射实现传播,之后通过耦出体光栅平行出射,最后在人眼前成像。一般情况下,衍射光波导的耦入和耦出元件是镜像对称设计的,本文只讨论耦入体光栅。

在光波导中,耦入体光栅的作用是将平行光耦合进入平板波导内部传输,其衍射特性中的角

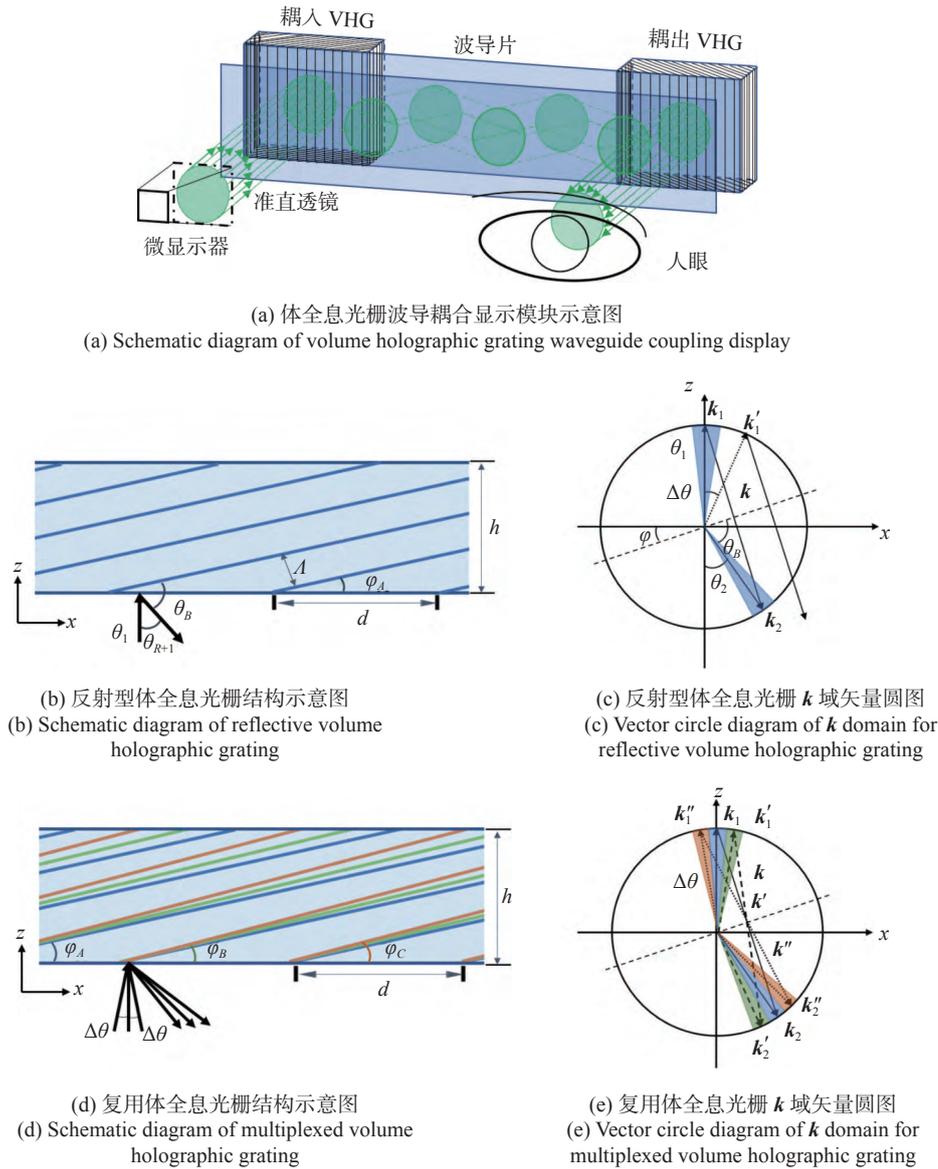


图 1 体全息光栅波导工作原理

Fig. 1 Working principle of volume holographic grating waveguide

度带宽决定了增强现实眼镜近眼显示成像的视场角。如图 1(b)(彩图见期刊电子版)为体光栅结构示意图,当体光栅记录条纹时,波长为 λ 的参考光与物光在光栅介质两侧入射,形成的干涉条纹间隔为 Λ ,条纹与光栅表面的夹角为光栅条纹倾角 φ ,在光栅表面的条纹间距为光栅周期 d ,满足 $d = \Lambda / \sin \varphi$, h 为体光栅的厚度。当体光栅再现时,入射光波长为 λ ,以记录入射角 θ_1 照射, θ_{R+1} 为反射+1级衍射光角度。光在波导中全反射传输,全反射角 θ_{TR} 满足如下条件:

$$\arcsin \frac{1}{n_{wg}} < \theta_{TR} < \frac{\pi}{2}, \quad (1)$$

其中, n_{wg} 为波导材料折射率。当衍射角 θ_{R+1} 在此

取值范围内时,即满足波导内全反射传输的条件。

图 1(c)(彩图见期刊电子版)展示了反射型体光栅记录与再现的 k 域矢量圆图。在记录条件下,用 k_1 和 k_2 分别表示体光栅记录介质两侧参考光与物光的波矢, $|k_1| = |k_2| = 2\pi/\lambda$,与 z 轴的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 ,光栅矢量为 k , $|k| = 2\pi/\Lambda$ 。连接 k_1 , k_2 和光栅矢量 k endpoints 围成一个等腰三角形,并内接于以 $2\pi/\lambda$ 为半径的 k 域矢量圆内,布拉格角 θ_B 为 k_1 或 k_2 与光栅矢量 k 法线的夹角,并满足如下关系:

$$\theta_B = \theta_1 + \frac{\pi}{2} - \varphi, \quad (2)$$

光栅条纹倾角 φ 为光栅矢量 k 的法线与 x 轴的夹

角, 在体光栅结构中, 根据几何关系容易推出衍射角 θ_2 :

$$\theta_2 = \pi - 2\theta_B + \theta_1 \quad (3)$$

光栅条纹间隔 Λ 与布拉格角 θ_B 满足如下布拉格条件:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n \sin \theta_B} \quad (4)$$

其中, n 是体光栅的折射率。

在体光栅再现条件下, 如果入射光波矢为 \mathbf{k}_1 且入射光的角度和记录时角度 θ_1 一致, 此时连接 \mathbf{k}_1 和 \mathbf{k} 的端点后, 光栅矢量 \mathbf{k} 的另一端点必然落在 \mathbf{k} 域矢量圆上, 满足布拉格条件。衍射光波矢为 \mathbf{k}_2 , 衍射角为 θ_2 , 满足全反射条件, 此时衍射光强度的最大峰值理论上能达到 100%。

受布拉格条件影响, 记录单幅干涉条纹体光栅的角度带宽较小, 如图 1(c)(彩图见期刊电子版) 中蓝色区域所示。当入射角度发生偏移时, 偏移角为 $\Delta\theta$, 即 $\theta'_1 = \theta_1 + \Delta\theta$, 入射光波矢是如图 1(c) 所示的 \mathbf{k}'_1 。此时, 反射体光栅的 \mathbf{k} 域矢量圆图中, 连接 \mathbf{k}'_1 及光栅矢量 \mathbf{k} 后, \mathbf{k} 的末端未能落在原 \mathbf{k} 域矢量圆上, 闭合等腰三角形被破坏, 布拉格条件不再满足。因此, 随着 $\Delta\theta$ 的增大, 衍射光的强度急剧下降。

为了提高耦合元件体光栅的角度带宽, 本文提出一种复用等周期变倾角干涉条纹的反射型体光栅方法, 其结构如图 1(d)(彩图见期刊电子版) 所示。在同一片体光栅中, 通过复用的方式记录多幅等周期变倾角的干涉条纹 (图中所示为三幅)。不同于传统光栅复用方法, 本方法中复用记录的干涉条纹保持体光栅的表面周期 d 不变。该复用体光栅记录和再现的 \mathbf{k} 域矢量圆如图 1(e)(彩图见期刊电子版) 所示。在记录条件下, 通过合理选择物光和参考光的 \mathbf{k}_1 、 \mathbf{k}_2 , 同时复用另外两组参考光物光波矢 \mathbf{k}'_1 、 \mathbf{k}'_2 及 \mathbf{k}''_1 、 \mathbf{k}''_2 , 形成三幅倾角不同的封闭等腰三角形 \mathbf{k} 域矢量圆图。在再现条件下, 复用后的体光栅满足入射角范围扩展后所对应的布拉格条件, 使入射角度可变化区间 $\Delta\theta$ 增大, 体光栅角度带宽得到扩展, 如图 1(e) 中红色、蓝色、绿色区域所示。对比复用变周期的体光栅结构, 这种等周期复用后体光栅在扩展角度带宽的同时, 固定的表面周期避免了入射光线

衍射后, 衍射角发生改变, 能够减少增强现实眼镜在图像传输中因耦合元件产生的杂散光或者鬼像。

本文选取中心波长为 530 nm 的绿光, 设定入射光垂直入射, 即入射角 θ_1 为 0° 。由光波导的传输原理, 衍射角 θ_2 的大小需要满足全反射条件。根据公式 (1), n_{wg} 越大, 全反射角 θ_{TR} 的选定范围越宽, 因此波导片选取折射率较高的材料 ZF3 ($n_{wg}=1.73$)。设体光栅材料的介质折射率 $n = 1.73$, 折射率调制度 $\Delta n = 0.03$, 厚度 h 取 $20 \mu\text{m}$ 。公式 (1) 中, 满足全反射条件时可得全反射角 θ_{TR} 的取值范围为 $36^\circ < \theta_{TR} < 90^\circ$, 衍射角 θ_2 在波导中以全反射形式向前传播, 因此其取值范围为 $36^\circ < \theta_2 < 90^\circ$, 代入公式 (2), 得布拉格角为 $45^\circ < \theta_B < 72^\circ$, 根据公式 (3) 中布拉格角与条纹倾角的关系可求出条纹倾角满足: $18^\circ < \varphi < 45^\circ$ 。

3 模拟分析

本文采用严格耦合波理论 (RCWA) 分析复用等周期变倾角干涉条纹体光栅的衍射特性^[22]。RCWA 根据体光栅对光栅介质折射率调制的傅立叶展开, 求解对应的耦合波方程组, 联立不同光栅区域的边界条件, 最终数值求解得到衍射效率。在模拟分析中, 取 $x-z$ 平面为入射面, x 方向为体光栅介质面方向, z 方向为体光栅厚度方向, 体光栅区域介电常数为空间位置变化的周期函数, θ_1 介质的相对介电常数 ε_r 表示为:

$$\varepsilon_r(\mathbf{r}) = \varepsilon_{r0} + \Delta\varepsilon_{r1} \cdot \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \quad (5)$$

式中, ε_{r0} 为平均介电常数, $\Delta\varepsilon_{r1}$ 为介电常数的调制幅度, \mathbf{k} 是光栅矢量, \mathbf{r} 为空间点矢径。

介电常数 ε_r 和折射率 n 的关系是 $\varepsilon_r = n^2$, 且 $\Delta\varepsilon_{r1} = 2n_0 \cdot \Delta n$, 当介电常数的调制幅度 $\Delta\varepsilon_{r1} \ll \varepsilon_{r0}$ 时, 折射率 n 的空间变化表示为:

$$n(\mathbf{r}) = n_0 + \Delta n \cdot \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \quad (6)$$

其中, n_0 为平均折射率, Δn 为折射率调制度。

此时, 对公式 (6) 展开分析, 可得:

$$n(x, z) = n_0 + \Delta n \cdot \cos(\mathbf{k}_x x + \mathbf{k}_z z) = n_0 + \Delta n \cdot \cos(\mathbf{k}_x x + \alpha) \quad (7)$$

其中, 令 $\alpha = \mathbf{k}_z z = \mathbf{k} \cos \varphi z$, 表示光栅条纹在体光栅厚度 z 方向引起的折射率的相位变化, φ 为光栅

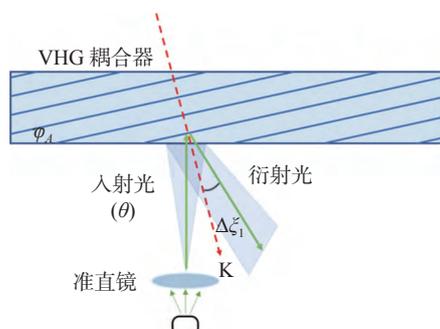
条纹倾角。

当有 n 幅干涉条纹复用时, 折射率可以表示为:

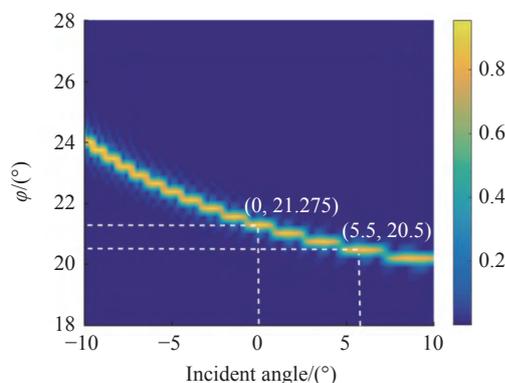
$$n = n_0 + \Delta n [w_1 \cdot \cos(\mathbf{k}_x \cdot \mathbf{x} + \alpha_1) + w_2 \cdot \cos(\mathbf{k}_x \cdot \mathbf{x} + \alpha_2) + w_3 \cdot \cos(\mathbf{k}_x \cdot \mathbf{x} + \alpha_3) + \dots + w_n \cdot \cos(\mathbf{k}_x \cdot \mathbf{x} + \alpha_n)] \quad (8)$$

其中, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ 分别为复用的不同倾角光栅条纹在体光栅厚度 z 方向引起的折射率的相位变化, $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ 分别为复用 n 幅图时每幅干涉条纹所占的权重比例。

如公式 (8) 所示, 复用体全息光栅的折射率为平均折射率和多个折射率调制度的叠加, 且



(a) 正入射体光栅衍射示意图
(a) Schematic of normal incidence volume holographic grating diffraction



(b) 衍射效率随光栅条纹倾角 φ 与入射角的变化关系
(b) The variation trend of diffraction efficiency with the change of grating fringe angle φ and incident angle

图 2 体光栅角度响应特性分析

Fig. 2 Analysis of angular response characteristics of volume holographic grating

从上述分析中可以看出, 体光栅的角度选择性在入射光垂直入射时强, 角度带宽相对较小。当入射光偏向光栅矢量 \mathbf{k} 正方向^[18], 以类似闪耀浮雕光栅自准直的入射条件倾斜入射体光栅时, 随着入射光与光栅矢量夹角 $\Delta\xi$ 减小, 体光栅的角度带宽得到扩展。从图 2(b) 的模拟结果可以看出, 当入射光以大于 0° 正方向倾斜入射体光栅时, 随着条纹倾角 φ 的减小, 体光栅的角度带宽比垂直入射时大。本文分析了在垂直入射以及倾斜入射两种情况下, 单幅干涉条纹体光栅及复用三幅等周期变倾角干涉条纹体光栅的衍射特性。

图 3(a)(彩图见期刊电子版) 展示了垂直入射条件下 ($\theta_1 = 0^\circ$), 复用等周期变倾角干涉条纹体光栅的衍射示意图。根据记录单幅干涉条纹时条纹倾角的最优结果, 本文在垂直入射条件下, 选择的

$w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n = 1$ 。根据严格耦合波理论, 可在体光栅不同区域边界上使用电磁场边界条件, 求解体光栅各级衍射波的衍射效率。

本文首先对记录单幅干涉条纹的反射型体光栅衍射特性进行仿真分析, 当入射光垂直入射 ($\theta_1 = 0^\circ$) 体光栅时, 体光栅衍射示意图如图 2(a)(彩图见期刊电子版) 所示。图 2(b)(彩图见期刊电子版) 展示了体光栅衍射效率随光栅条纹倾角 φ 与入射角变化的曲线, 可以看出受到布拉格条件的影响, 衍射效率对干涉条纹倾角 φ 非常敏锐。当入射光垂直入射, 如图中白色虚线所示, 在条纹倾角 $\varphi = 21.275^\circ$ 时, 体光栅的衍射效率最高, 因此在后续的模拟计算中, 将条纹倾角 φ_A 设定为 21.275° 。

复用中心干涉条纹倾角为 21.275° , 条纹间隔为 0.075° , 则 3 次复用的干涉条纹倾角 $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ 分别为 $21.2^\circ, 21.275^\circ, 21.35^\circ$ 。图 3(b) 计算了衍射效率随入射角的变化关系, 从黑色曲线可以看出, 入射光垂直入射体光栅时, 在 TE 和 TM 偏振态下, 记录单幅干涉条纹的体光栅角度带宽分别为 2° 和 1.6° , 能量较为集中, 衍射效率能达到 90% 以上。由图 3(b)(彩图见期刊电子版) 中的红色曲线可以看出, 复用三幅等周期变倾角干涉条纹后的体光栅, 整体衍射效率虽然有所降低, 但角度带宽得到了扩展。当入射光满足复用体光栅的布拉格条件时, 衍射效率能达到最大值。复用三幅等周期变倾角干涉条纹的体光栅在 TE 与 TM 偏振态下入射角的角度带宽分别扩展为 2.5° 和 2.2° , 相较于记录单幅干涉条纹的体光栅增加了 0.5° 和 0.6° 。

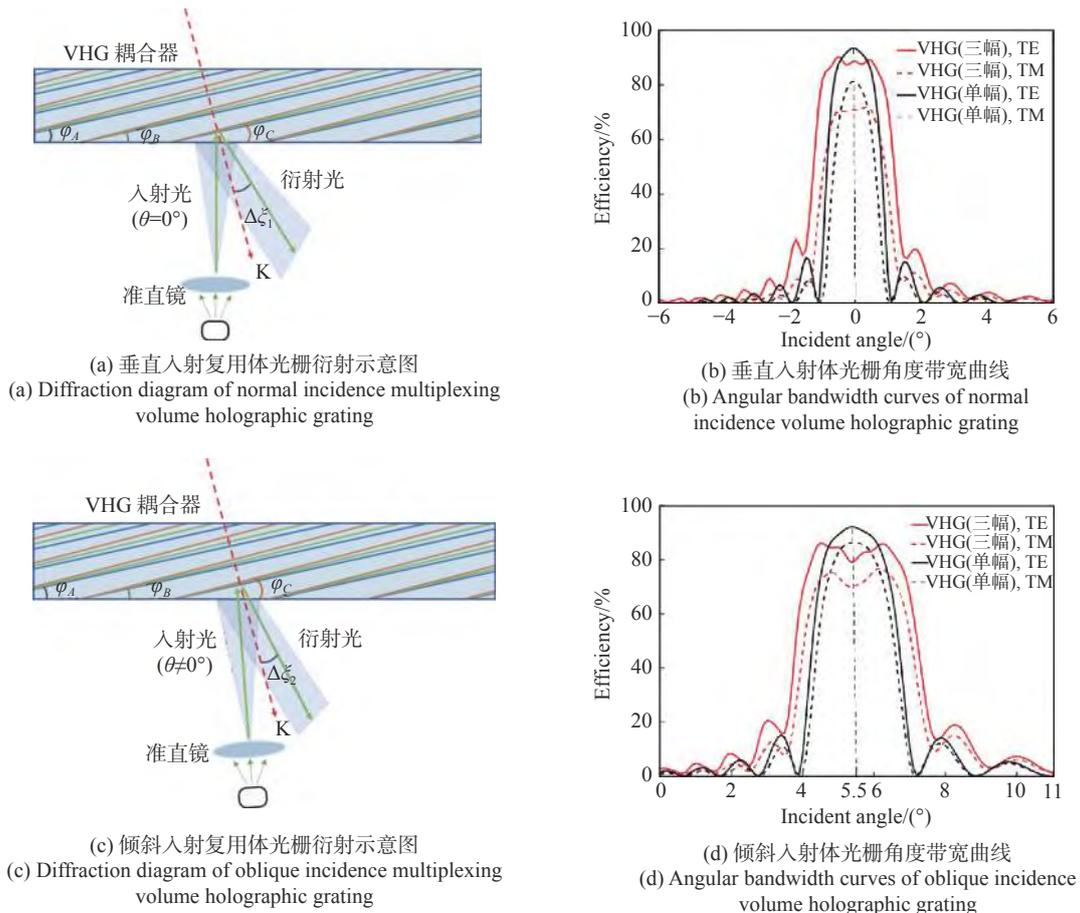


图 3 复用体光栅衍射特性分析

Fig. 3 Multiplexing volume holographic grating diffraction characteristics

接着,分析体光栅在倾斜入射 ($\theta_1 \neq 0^\circ$) 条件下,入射光靠近光栅矢量时角度带宽的响应特性。对复用等周期变倾角干涉条纹的体光栅衍射特性进行仿真分析,建立如图 3(c)(彩图见期刊电子版)所示倾斜入射体光栅衍射示意图。根据图 2(b)的仿真结果,在满足光波导内全反射条件下,取 θ_1 为 5.5° 入射体光栅,此时光栅条纹倾角 φ 为 20.5° 。因此,在倾斜入射条件下,选择复用的中心干涉条纹倾角为 20.5° ,条纹间隔为 0.075° ,则 3 次复用的干涉条纹倾角 φ_A 、 φ_B 、 φ_C 分别为 20.425° 、 20.5° 、 20.575° 。

计算复用体光栅衍射效率随入射角的变化关系如图 3(d)(彩图见期刊电子版)所示。从黑色曲线可以看出,在 TE 和 TM 偏振态下,倾斜入射记录单幅干涉条纹的体光栅时的角度带宽比垂直入射下体光栅的角度带宽大,分别为 2.8° 和 2.6° 。从图 3(d)中的红色曲线可以看出,在倾斜入射条件下,采用复用三幅等周期变倾角干涉条纹方法后的体光栅在 TE 与 TM 偏振态下入射角的角度

带宽分别扩展为 3.6° 和 3.3° ,比仅记录单幅干涉条纹的体光栅增加了 0.8° 和 0.7° 。

图 4(彩图见期刊电子版)展示了在满足布拉格条件下,体光栅的角度带宽随入射角的变化情况。图中红色曲线和黑色曲线分别是复用三幅等周期变倾角干涉条纹和记录单幅干涉条纹的体光栅角度带宽变化情况,实线和虚线分别代表

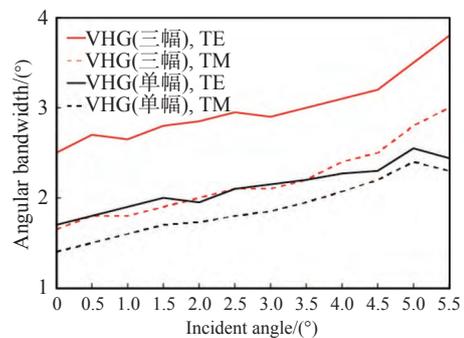


图 4 体光栅与复用体光栅角度带宽随入射角度的变化曲线
Fig. 4 Angular bandwidth of volume grating and multiplexed volume grating varying with incident angle

TE、TM 偏振态的入射光。当入射角大于 5.5° 后, 根据光波导的几何关系, 衍射角度范围超出了波导的全反射条件。从图中可以看出, 随着入射角越来越靠近光栅矢量的正方向, TE 和 TM 偏振态下的体光栅角度带宽呈增长趋势, 相比于垂直入射记录单幅干涉条纹的体光栅。倾斜入射复用等周期变倾角干涉条纹体光栅的带宽扩展了 1 倍, 复用后的体光栅有利于扩展增强现实眼镜视场角。

4 讨论

4.1 复用不同倾角间隔的干涉条纹对体光栅角度带宽的影响

在垂直入射条件下, 复用三幅干涉条纹的倾角间隔为 0.1° , 则条纹倾角分别为 21.175° 、 21.275° 、 21.375° , 得到如图 5(a) 所示的仿真结果。复用后

体光栅的角度带宽在 0° 处出现了一处较大的凹陷。当复用干涉条纹倾角间隔扩大为 0.2° 时, 复用条纹倾角分别为 21.075° 、 21.275° 、 21.475° , 得到图 5(b) 所示的仿真结果。复用后体光栅的角度带宽在 $\pm 0.5^\circ$ 处出现了两处较大的凹陷。

当倾斜入射时, 复用三幅干涉条纹的倾角间隔为 0.1° , 则条纹倾角分别为 20.4° 、 20.5° 、 20.6° , 得到如图 5(c) 所示的仿真结果。发现拼接处视场角在 5.5° 处的角度带宽中出现了一处较大的凹陷。当复用干涉条纹倾角间隔扩大为 0.2° 时, 复用条纹倾角分别为 20.3° 、 20.5° 、 20.7° , 得到如图 5(d) 所示的仿真结果。拼接处 4.5° 和 6.5° 处的角度带宽中出现了两处较大的凹陷。

复用等周期变倾角干涉条纹的体光栅角度带宽中出现的凹陷, 会导致光波导在出瞳处成像时亮度不均匀, 造成图像信息缺失, 影响人眼的视觉感受。因此, 在使用等周期变倾角干涉条纹复用

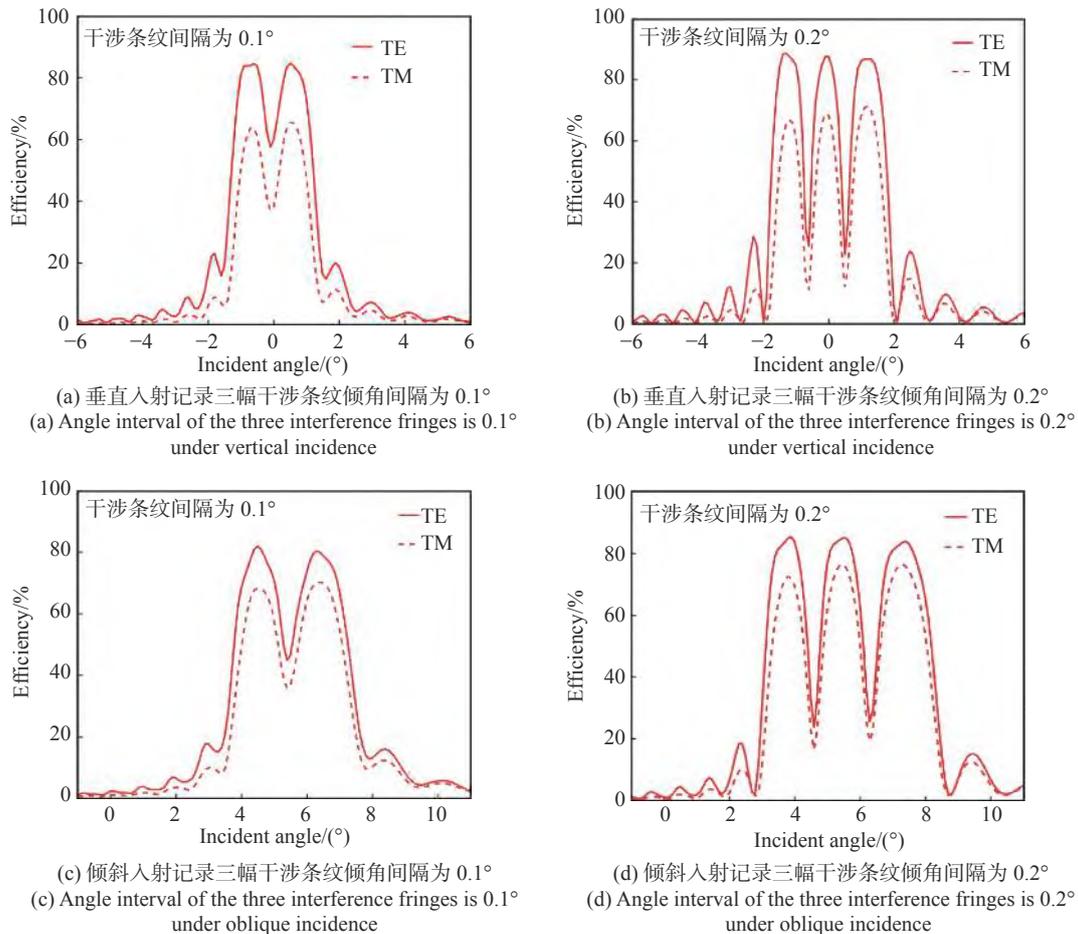


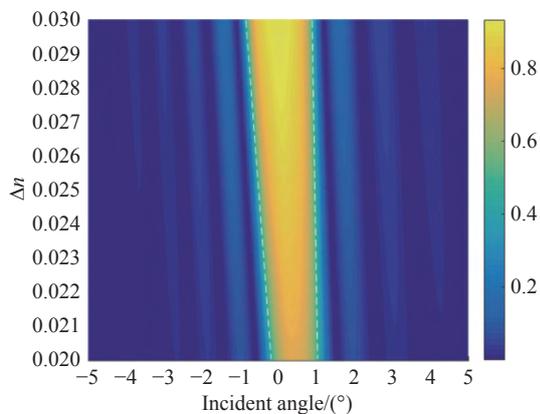
图 5 不同入射条件下干涉条纹倾角间距对体全息光栅衍射特性影响

Fig. 5 The influence of interference fringe inclination angle interval on the diffraction characteristics of volume holographic grating under different incident conditions

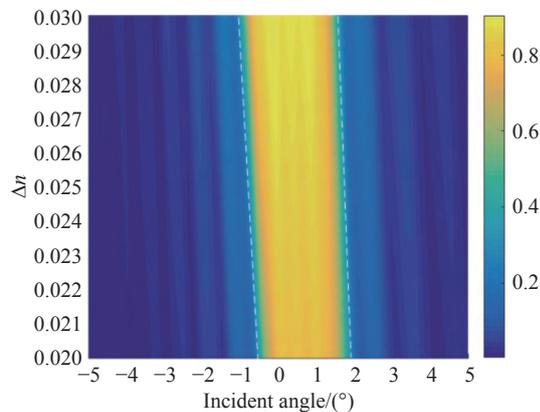
法时, 要对记录干涉条纹的角度间隔进行合理的选择。

4.2 折射率调制度 Δn 对体光栅角度带宽的影响

图 6(彩图见期刊电子版) 计算了体光栅衍射效率随折射率调制度的变化情况, 图中白色虚线是衍射效率为 0.5 的等高线。图 6(a) 是体光栅记录单幅干涉条纹的情况, 从图中可以看出, 在体光栅厚度不变的情况下, 体光栅的角度带宽随折射率调制度 Δn 的提高呈增长趋势。然而, 通过制备更高折射率调制度的光致聚合物材料提高体光栅角度带宽, 已经到达瓶颈。



(a) 体光栅角度带宽随 Δn 变化的响应
(a) Response of VHG angular bandwidth to Δn



(b) 复用体光栅角度带宽随 Δn 变化的响应
(b) Response of multiplexed VHG angular bandwidth to Δn

图 6 折射率调制度对体光栅衍射特性的影响

Fig. 6 Effect of refractive index modulation on diffraction characteristics of volume holographic grating

图 6(b) 是体光栅复用等周期变倾角干涉条纹的情况。从图中可以看出, 在折射率调制度相同的条件下, 对比记录单幅干涉条纹体光栅, 复用后的体光栅角度响应带宽有比较显著的提升, 能够在低的折射率调制度材料中呈现出大的角度带宽。由此可知, 本文所采取的方法有助于实现大

角度带宽的体光栅耦合器设计, 说明增强现实衍射光波导方案可实现较大的视场角。

4.3 体光栅光波导的视场角分析

微显示器发出的光束经过准直透镜准直后, 光束耦合进入体光栅波导内的光线传输过程如图 7 所示。当光束从空气中进入波导内, 最左侧和最右侧的入射角分别为 $\theta_{L_{\text{air}}}$ 和 $\theta_{R_{\text{air}}}$, 在空气与波导界面处满足折射定律, 并且在波导中的折射角分别为 $\theta_{L_{\text{wg}}}$ 和 $\theta_{R_{\text{wg}}}$, 因此可得:

$$\begin{cases} n_{\text{wg}} \sin \theta_{L_{\text{wg}}} = n_{\text{air}} \sin \theta_{L_{\text{air}}} \\ n_{\text{wg}} \sin \theta_{R_{\text{wg}}} = n_{\text{air}} \sin \theta_{R_{\text{air}}} \end{cases} \quad (9)$$

波导中的光束折射角即为体光栅的入射角, 因此 $\theta_{L_{\text{wg}}}$ 与 $\theta_{R_{\text{wg}}}$ 之和应小于等于体光栅的角度带宽。所以, 波导系统的左右视场角满足:

$$\begin{cases} \theta_{L_{\text{FOV}}} = \frac{\arcsin(n_{\text{wg}} \sin \theta_{L_{\text{wg}}})}{n_{\text{air}}} \\ \theta_{R_{\text{FOV}}} = \frac{\arcsin(n_{\text{wg}} \sin \theta_{R_{\text{wg}}})}{n_{\text{air}}} \end{cases} \quad (10)$$

在设计优化体光栅结构后, 根据模拟分析体光栅得到角度带宽, 可以计算出体光栅的角度带宽所能实现的视场角大小。

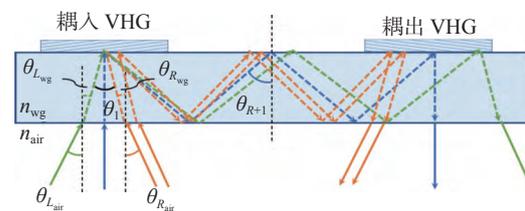


图 7 体光栅光波导的视场角分析示意图

Fig. 7 Schematic diagram of FOV analysis for the volume holographic grating waveguide

当垂直入射时, 根据公式 (10) 可知, 此时记录单幅干涉条纹的体光栅波导在 TE、TM 偏振态下的角度带宽分别为 2° 和 1.6° , 因此, 对应的视场角分别有 3.4° 和 2.9° ; 复用三幅等周期变倾角干涉条纹的体光栅波导在 TE、TM 偏振态下的角度带宽分别为 2.5° 和 2.2° , 因此, 对应的视场角分别有 4.4° 和 3.8° 。

当倾斜入射时, 根据公式 (10) 可知, 此时记录单幅干涉条纹的体光栅波导在 TE、TM 偏振态下的角度带宽分别为 2.8° 和 2.6° , 因此, 对应的视场角分别为 4.9° 和 4.6° ; 复用三幅等周期变倾角干涉条纹的体光栅波导在 TE、TM 偏振态下的角

度带宽分别为 3.6° 和 3.3° , 因此, 对应的视场角分别为 6.3° 和 5.7° 。

5 结 论

本文通过在一片体光栅上同时复用多幅周期相同倾角不同的干涉条纹, 满足不同入射角的布拉格条件, 从而提升体光栅角度带宽, 可以实现以体光栅为耦合元件的光波导近眼显示成像视场角扩展。文中利用严格耦合波对复用三幅干涉条纹

的体光栅进行仿真, 在波长为 530 nm 的 TE 和 TM 偏振态下, 复用三幅等周期变倾角干涉条纹体光栅的角度带宽分别为 3.6° 和 3.3° , 与仅记录单幅干涉条纹的体全息光栅相比, 角度带宽扩展了 1 倍。本文提出的方法通过保持等周期复用, 调整记录干涉条纹倾角的间隔以实现更多幅干涉条纹的复用, 有利于设计低杂散光且具有更大角度带宽的体光栅作为增强现实眼镜的耦合元件, 有望实现更轻薄、大视场、结构紧凑的增强现实眼镜。

参考文献:

- [1] XIONG J H, HSIANG E L, HE Z Q, *et al.*. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 216.
- [2] SANDO Y, SATOH K, BARADA D, *et al.*. Holographic augmented reality display with conical holographic optical element for wide viewing zone[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 26-34.
- [3] CHENG D W, WANG Q W, LIU Y, *et al.*. Design and manufacture AR head-mounted displays: a review and outlook[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(3): 350-369.
- [4] PARK J H, LEE B. Holographic techniques for augmented reality and virtual reality near-eye displays[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 137-150.
- [5] GUO X M, HUANG H, SONG Q, *et al.*. Design of waveguide system using one dimension slant grating and two dimension grating[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2020, 51(S1): 23-27.
- [6] ROBERTS D C, SNARSKI S, SHERRILL T, *et al.*. Soldier-worn augmented reality system for tactical icon visualization[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8383: 838305.
- [7] KRESS B C, PACE M. Holographic optics in planar optical systems for next generation small form factor mixed reality headsets[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(4): 771-801.
- [8] ZHAN T, YIN K, XIONG J H, *et al.*. Augmented reality and virtual reality displays: perspectives and challenges[J]. *iScience*, 2020, 23(8): 101397.
- [9] 徐越, 范君柳, 孙文卿, 等. 基于全息波导的增强现实头盔显示器研究进展[J]. *激光杂志*, 2019, 40(1): 11-17.
XU Y, FAN J L, SUN W Q, *et al.*. Research progress of augmented reality head-mounted display based on holographic waveguide[J]. *Laser Journal*, 2019, 40(1): 11-17. (in Chinese)
- [10] 姜玉婷, 张毅, 胡跃强, 等. 增强现实近眼显示设备中光波导元件的研究进展[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(1): 28-44.
JIANG Y T, ZHANG Y, HU Y Q, *et al.*. Development of optical waveguide elements in augmented reality near-eye displays[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(1): 28-44. (in Chinese)
- [11] 黄颂超, 冯云鹏, 程灏波. 非对称轻小型头盔显示器光学系统设计[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 832-841.
HUANG S CH, FENG Y P, CHENG H B, *et al.*. Non-symmetrical design of a compact, lightweight HMD optical system[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 832-841. (in Chinese)
- [12] 史晓刚, 薛正辉, 李会会, 等. 增强现实显示技术综述[J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1146-1161.
SHI X G, XUE ZH H, LI H H, *et al.*. Review of augmented reality display technology[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1146-1161. (in Chinese)
- [13] FROMMER A. 11-3: *Invited paper*: lumus optical technology for AR[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 134-135.
- [14] ZHANG Y, FANG F ZH. Development of planar diffractive waveguides in optical see-through head-mounted displays[J]. *Precision Engineering*, 2019, 60: 482-496.
- [15] WALDERN J D, GRANT A J, POPOVICH M M. 17-4: DigiLens AR HUD waveguide technology[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 204-207.

- [16] SHEN ZH W, ZHANG Y N, WENG Y SH, *et al.*. Characterization and optimization of field of view in a holographic waveguide display[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(6): 7000911.
- [17] OKU T, AKUTSU K, KUWAHARA M, *et al.*. 15.2: High-luminance see-through eyewear display with novel volume hologram waveguide technology[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(1): 192-195.
- [18] MUKAWA H, AKUTSU K, MATSUMURA I, *et al.*. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2009, 17(3): 185-193.
- [19] 刘粟. 彩色全息波导显示系统中的关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
LIU A. *Study on the mechanism and key technology of the colorful holographic waveguide display*[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [20] 谢豪, 霍富荣, 薛常喜. 用于头戴显示的新型耦合光栅结构优化设计与分析[J]. 光学学报, 2022, 42(14): 1405001.
XIE H, HUO F R, XUE CH X. Optimal design and analysis of new coupled grating structure for head-mounted display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1405001. (in Chinese)
- [21] HAN J, LIU J, YAO X CH, *et al.*. Portable waveguide display system with a large field of view by integrating freeform elements and volume holograms[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3534-3549.
- [22] MOHARAM M G, GAYLORD T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, 71(7): 811-818.

作者简介:



彭灿福(1998—),男,福建泉州人,硕士研究生,2020年于闽南师范大学获得学士学位,主要从事光栅设计、AR光波导光学设计等方面的研究。
E-mail: pengcanfu@163.com



张伟(1990—),男,山西大同人,博士,副研究员,2011年于电子科技大学获学士学位,2016年于中国科学院大学获博士学位,主要从事光栅理论设计及制作工艺、微纳光学等方面的研究。E-mail: zhangwei1990@ciomp.ac.cn