

增强现实显示衍射光波导的设计

刘明欢, 付秀华, 王菲, 唐健, 冯东洋, 刘风雷

引用本文:

刘明欢, 付秀华, 王菲, 等. 增强现实显示衍射光波导的设计[J]. 液晶与显示, 2021, 36(3): 389–397.

LIU Ming-huan, FU Xiu-hua, WANG Fei, et al. Design of augmented reality display diffraction optical waveguide[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(3): 389–397.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0214>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种应用在增强现实领域的倾斜液晶/聚合物体光栅的制备

Fabrication of slanted liquid crystal/polymer volume grating applied to augmented reality

液晶与显示. 2020, 35(10): 1012–1018 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203510.1012>

用于智能显示的相位型计算全息图的设计

Design of phase type computer-generated-hologram for intelligent display

液晶与显示. 2018, 33(3): 245–253 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183303.0245>

聚合物分散液晶柔性全息曲面光栅的研究

Polymer dispersed liquid crystal flexible holographic curved grating

液晶与显示. 2021, 36(2): 237–245 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0177>

基于微结构阵列基板的高效顶发射OLED器件

High-efficiency top-emitting OLEDs based on microstructure array substrate

液晶与显示. 2019, 34(8): 725–732 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193408.0725>

基于 Berreman 4×4 矩阵对胆甾相液晶 Bragg 反射带宽的模拟研究

Simulation research on Bragg reflection bandwidth of cholesteric liquid crystal based on Berreman 4×4 matrix

液晶与显示. 2015(5): 777–783 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153005.0777>

文章编号:1007-2780(2021)03-0389-09

增强现实显示衍射光波导的设计

刘明欢^{1,2*}, 付秀华¹, 王 菲¹, 唐 健², 冯东洋², 刘风雷²

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 浙江水晶光电科技股份有限公司 中央研究院, 浙江 台州 318015)

摘要:提出了在波矢 k 空间中设计衍射光波导片的相关理论, 系统仿真并研究了光线波长、光栅周期、光栅时钟角、波导基底折射率以及波导基底折射率色散对衍射光波导视场角以及相关设计参数的影响。设计结果表明, 当使用宽光谱光源时, 光谱带边缘波长的视场存在切割, 对显示效果影响不大, 衍射光波导片适用于宽光谱光源。波导基底折射率色散对衍射光波导设计的影响可以忽略。时钟角为 40-270-140 时, 各个光栅区域位置及尺寸合适, 适合于实际加工。本工作对衍射光波导的设计提供了积极的指导和借鉴。

关键词:增强现实; 衍射光波导; 波矢空间

中图分类号: O753⁺.2; TP 217 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2020-0214

Design of augmented reality display diffraction optical waveguide

LIU Ming-huan^{1,2*}, FU Xiu-hua¹, WANG Fei¹, TANG Jian²,

FENG Dong-yang², LIU Feng-lei²

(1. *Faculty of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China;*

2. *Academia Sinica, Zhejiang Crystal-Optech Co., Ltd., Taizhou 318015, China*)

Abstract: A design theory was demonstrated to design diffraction optical waveguides in wave-vector space. Systematic simulations were performed to investigate relationships among wavelength, grating period, clocking angle, waveguide substrate refractive index, dispersion to field of view and related parameters. Simulation results showed that light sources with broad bandwidth showed little effect on the design results because of the acceptable result of the edge wavelength FOV cutting. The dispersion of waveguide substrate showed negligible effect on diffraction optical waveguides. It is easy to manufacture to choose 40-270-140 clock-angle in design because of the suitable dimensions and positions of grating areas. The results in this work provide positive guides to design diffraction optical waveguides.

收稿日期: 2020-08-25; **修订日期:** 2020-10-17.

基金项目: 军委科技委基础加强重点项目(No.2019-JCJQ-ZD-320-00); 国家自然科学基金重点项目(No.U1937201)

Supported by Key Project of Basic Strengthening of Science and Technology Commission of the Military Commission (No.2019-JCJQ-ZD-320-00); Key Project of National Natural Science Foundation of China (No.U1937201)

* 通信联系人, E-mail: liuminghuan13@mails.ucas.edu.cn

Key words: augmented reality; diffraction waveguides; wave-vector space

1 引言

近些年来,被誉为下一代移动计算平台的增强现实(Augmented Reality, AR)显示广受国内外科技公司以及科研院所的关注^[1-3]。增强现实显示设备通常由计算处理单元、光学显示模组、传感器模组以及控制电路组成。增强现实显示通过将计算生成的虚拟图像经由光学显示模组投影到人眼的入瞳,并与现实空间叠加在一起,形成亦真亦幻的显示效果。增强现实显示以其人机可交互性、逼真的沉浸感以及丰富的想象空间为使用者提供前所未有的显示体验,在工业界以及消费类电子领域有着非常广阔的应用前景和空间^[4-5]。

增强现实显示的实现方式通常为基于传统几何光学的透镜方案以及衍射光波导方案^[6]。几何光学方案有以美国 ODG 公司为代表的 Bird Bath 方案,以色列 Lumus 的几何阵列波导方案,韩国 LetinAR 微孔阵列方案,加拿大 North Focals 的激光束扫描(Laser Beam Scanning, LBS)方案;衍射光波导方案主要有 Microsoft, Magic leap 和 Wave Optics 的表面浮雕方案,以及 Digilens 的全息体光栅方案。其中,Bird Bath 的显示效果是最优的,但由于其体积相对比较庞杂,暂时还未被列为实现增强现实显示的主流方案;Lumus 的几何阵列波导方案由于设计端对加工端的要求比较苛刻,暂时也无法成为首选;激光束扫描方案受限于系统出瞳的限制,无法匹配用户瞳间距存在一定分布的需求;衍射光波导方案,通过使光线在波导内部全内反射传播,可以将显示模块设计得更加轻薄化并更加接近眼镜形态,因此,是比较符合尺寸形态需求的相对较好的方案^[7-8]。

衍射光波导方案的光栅区通常由耦合、中继以及耦合光栅组成。其中,耦合光栅将投影光机投射出的光线耦合入至光波导内部,并以全内反射的形式传播至中继光栅;中继光栅将光瞳进行水平或者垂直方向的光瞳扩展,并将光线转折至耦合光栅区;耦合光栅对光瞳进行垂直或者水平方向的光瞳扩展,将光线耦合形成一定大小眼动范围 eye box 的虚像观察区域,供人眼观测^[9]。

本工作在波矢空间中,基于光的衍射理论,利

用 CAD (Computer Assisted Design) 软件 MATLAB Runtime R2019a 系统仿真并研究了光线波长、光栅周期、光栅时钟角、波导基底折射率以及波导基底折射率色散对衍射光波导视场角(Field of View, FOV)以及相关设计参数的影响,系统阐述了基于光的衍射理论设计衍射光波导的方法。

2 理论

对于衍射光波导,已经不能利用传统的几何光线传播理论去描述光线在其内部传播的物理特性。在本工作中,基于 k 空间中波矢的矢量运算对其进行阐述^[10-12]。

图 1 所示为 k 空间示意图。其中 k 为入射光线波矢,指向视场中心, $k=(k_x, k_y, k_z)$ 为 x, y, z 方向的分量。这里,光线矢量的模值 k 定义为 $k=2\pi/\lambda$, λ 为入射光线在真空中的波长, θ 为垂直方向的角度(相对于 $yo z$ 平面的角度,即极角), φ 为水平方向的角度(相对于 xoz 平面的角度,即方位角)。对于给定具有矩形边界的 FOV,

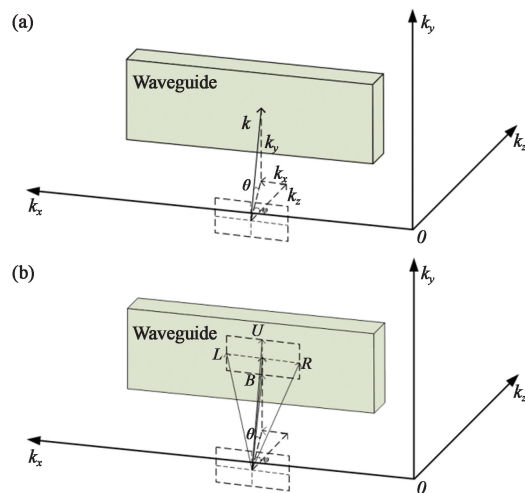


图 1 k 空间示意图。(a) 波矢投影在各方向的分量;(b) 视场边缘 U (Up), B (Bottom), L (Left) 以及 R (Right)。

Fig.1 Schematic diagram of k wave vector. (a) Projection of wave-vector in all directions; (b) FOV edge U (Up), B (Bottom), L (Left) and R (Right).

其上下左右4个边缘用 U, B, L 以及 R 表示。

在衍射光波导中,考察的是对于给定的波长以及视场,在其波导内部的传播情况。FOV在 k 空间中的投影如图2所示。

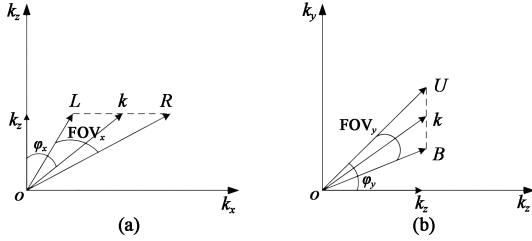


图2 FOV在 k 空间投影示意图。(a) FOV_x 在 xoz 平面内投影;(b) FOV_y 在 yoz 平面内投影。

Fig.2 Schematic illustration of FOV projection. (a) FOV_x projection in xoz coordinate plane; (b) FOV_y projection in yoz coordinate plane.

经过理论推导, U, B, L, R 的坐标可以表达为如下公式:

$$L = k_z (\tan[\varphi_x - \frac{FOV_x}{2}], \tan\varphi_y), \quad (1)$$

$$R = k_z (\tan[\varphi_x + \frac{FOV_x}{2}], \tan\varphi_y), \quad (2)$$

$$U = k_z (\tan\varphi_x, \tan[\varphi_y + \frac{FOV_y}{2}]), \quad (3)$$

$$B = k_z (\tan\varphi_x, \tan[\varphi_y - \frac{FOV_y}{2}]). \quad (4)$$

其中: φ_x 与 φ_y 为波矢 k 在 xoz 与 yoz 坐标平面内相对于 z 方向的夹角, FOV_x 与 FOV_y 为系统在 x 与 y 方向的视场角。 φ_x 与 φ_y 定义如下:

$$\varphi_x = \varphi, \quad (5)$$

$$\varphi_y = a \tan(\frac{\tan\theta}{\tan\varphi}). \quad (6)$$

通过公式(1~6)并经过归一化处理,建立起FOV上任意一点的位置坐标。

图3为光栅对 k 空间中波矢传播作用的示意图。初始FOV经过耦合(Input)、中继(Fold)以及耦合(Output)光栅的作用,最后回到初始位置,以保证全部FOV可以在波导内部传播。即耦合、中继以及耦合光栅波矢需满足如下矢量关系:

$$\vec{k}_{IG} + \vec{k}_{FG} + \vec{k}_{OG} = \vec{0}. \quad (7)$$

如果,经过耦合光栅作用后,与初始FOV位置部分重叠,则最终得到的将被部分切割的FOV,即经过投影光机投影的信息将不能完全参与成像。较小以及较大的虚线圆域表示FOV可以在波导内部传递的边界,如果FOV触碰到边界,那么FOV将被切割, k_{max} 与 k_{TIR} 由如下公式定义:

$$k_{TIR} = \frac{1}{\lambda}, \quad (8)$$

$$k_{max} = \frac{n}{\lambda} \sin\theta_{max}, \quad (9)$$

其中: n 为波导基底的折射率, θ_{max} 为光线发生全内反射时可以接受的最大角度,例如可以设定为 75° 。由于衍射光栅的色散系数为负值,相比较于传统透镜的短波长光谱分量具有较大折射角,其表现为短波长光谱分量具有较小的衍射角, θ_{max} 值设定越大,将导致红光与蓝光分量在波导内传播分得越开,不利于衍射光波导显示的颜色均匀性。因此, θ_{max} 数值根据实际设计设定^[12]。

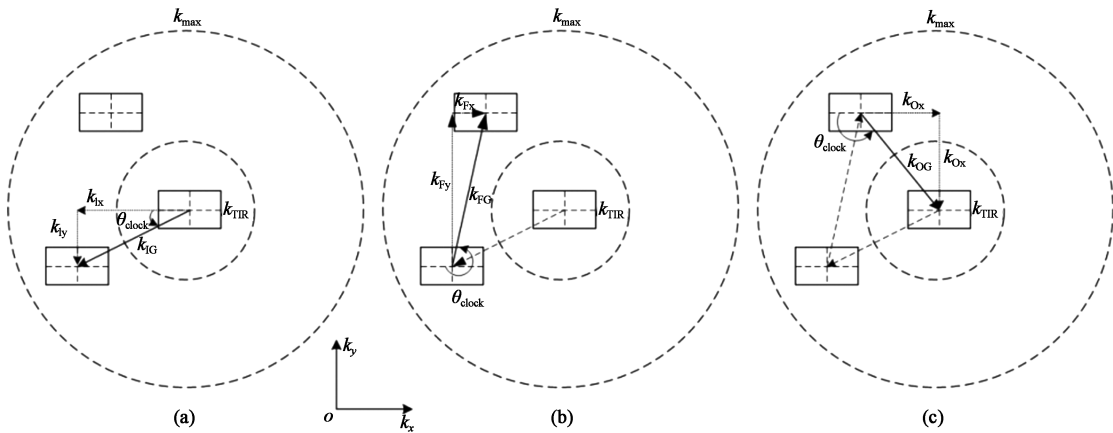


图3 光栅对 k 空间中波矢传播作用示意图。(a)耦合;(b)中继;(c)耦合。

Fig.3 Schematic diagram of grating to wave-vector propagation in k space. (a) Input; (b) Fold; (c) Output.

耦入、中继以及耦出光栅的波矢与其分量以及时钟角的关系定义如下:

$$k_{I(F,O)G} = \frac{2\pi}{\Lambda_{I(F,O)G}}, \quad (10)$$

$$k_{I(F,O)x} = k_{I(F,O)G} \cos \theta_{\text{clock}}, \quad (11)$$

$$k_{I(F,O)y} = k_{I(F,O)G} \sin \theta_{\text{clock}}. \quad (12)$$

3 结果与讨论

3.1 衍射光波导设计结果

根据第二章中的理论,在 Matlab Runtime R2019a 中运行程序。

图 4 为一款视场角 25° ,宽高比 $16:9$ 的衍射光波导的设计结果。设计波长为 550 nm ,基底折射率为 1.51 , θ_{max} 为 75° 。

根据图 4(a)的设计结果,初始 FOV 经过 45° 偏转后到达耦入光栅,耦入光栅区的 FOV 经过 270° 偏转到达中继光栅,中继光栅区的 FOV 经过 135° 偏转回到初始 FOV,与初始 FOV 完全重合在一起。因此,出射 FOV 是初始 FOV 的完美再现,初始 FOV 上的任一点都可以经过衍射光波导的耦出光栅出射,图 4(b)的结果证明了这一点。根据公式(8)和(9),FOV 传递的内边界为 $1.81 \mu\text{m}^{-1}$,外边界为 $2.745 \mu\text{m}^{-1}$ 。出射 FOV 的水平 FOV 为 21.92° ,垂直 FOV 为 12.33° ,与初始设计值一致。图 4(c)为光栅的位置以及尺寸的设计结果,这里将耦出光栅的中心设置为基准点,耦出与耦入光栅的中心偏离 40 mm 。光栅区的整体尺寸为 $52.61 \text{ mm} \times$

41.33 mm ,耦入光栅的尺寸为 $8.9 \text{ mm} \times 6.8 \text{ mm}$,耦出光栅的尺寸为 $16.3 \text{ mm} \times 12.8 \text{ mm}$,中继光栅是形状不规则的多边形区域,尺寸约为 $18 \text{ mm} \times 27 \text{ mm}$ 。将耦入光栅划分为 4 个光瞳区域,经过耦出光栅耦出后,可以看到各个光瞳发生 180° 旋转。衍射光波导的出瞳距 (eye relief) 为 15 mm ,眼动范围 (eye box) 为 $10.5 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm}$ 。光栅的具体参数请参列表 1。为保持出射 FOV 与入射 FOV 一致,耦出光栅的周期与耦入光栅周期相同。图 4(c)中,右侧 $8.9 \text{ mm} \times 6.8 \text{ mm}$ 光栅区对应的是耦入光栅,中间不规则区域对应的是中继光栅,左侧 $16.3 \text{ mm} \times 12.8 \text{ mm}$ 区域对应的是耦出光栅。即投影信息经过右侧的 $8.9 \text{ mm} \times 6.8 \text{ mm}$ 光栅区域进入衍射光波导片,对应的投影光机的出瞳尺寸是 4 mm ,投影光机的出瞳到耦入光栅的距离是 10 mm 。投影信息经过耦入光栅耦入后经过全内反射入射至中继光栅,对光瞳进行水平方向的扩展,然后传递至耦出光栅进行垂直方向的光瞳扩展,即对光瞳进行二维的光瞳扩展。衍射光波导片对应的出瞳尺寸为 $10.5 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm}$,对应的耦出光栅尺寸为 $16.3 \text{ mm} \times 12.8 \text{ mm}$,正常人眼的光瞳直径约为 4 mm 左右,已经足够适配人眼观察。耦入、中继以及耦出光栅的类型为多光束全息曝光液晶/光敏单体混合物制备的液晶/聚合物体全息光栅。由于体光栅理论上仅存在一个衍射级次,可以有效提升系统的光效。波导类型为厚度为上下平板玻璃中间体全息光栅的平板波导结构。

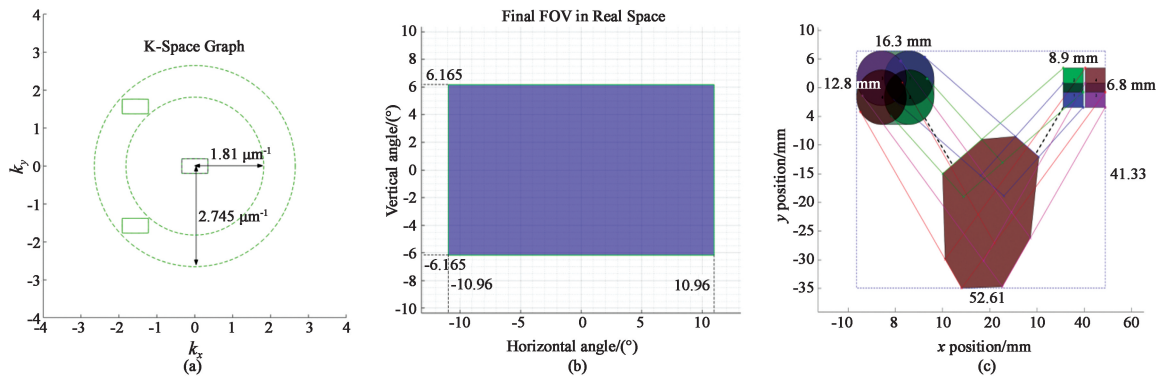


图 4 视场角 25° ,宽高比 $16:9$ 的衍射光波导的设计结果。(a) k 空间;(b)出射 FOV;(c)光栅位置及尺寸。

Fig.4 Simulation results of a $16:9$ aspect ratio, 25° FOV diffraction optical waveguides. (a) k space; (b) Output FOV; (c) Grating positions and dimensions.

表1 中心波长为 550 nm 的光栅参数

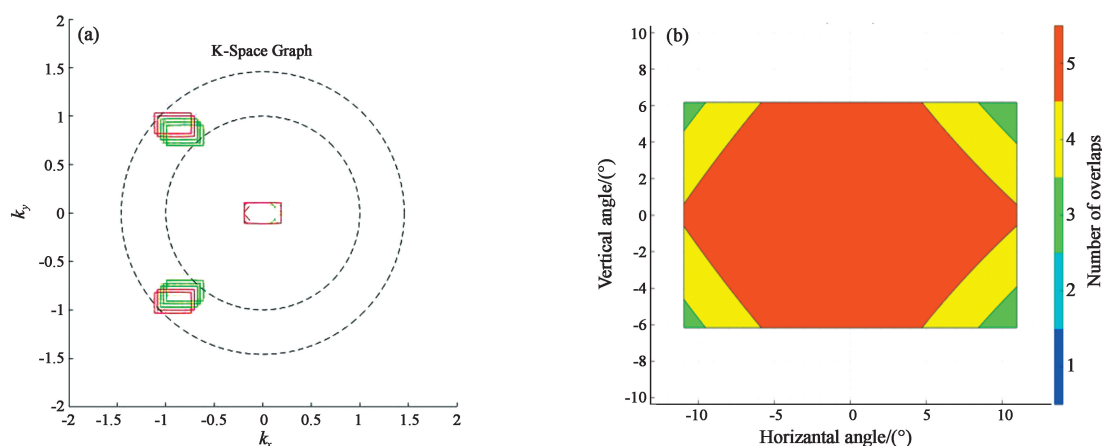
Tab.1 Grating parameters of central wavelength at 550 nm

Grating	Period / μm	Clock angle/($^\circ$)
Input	0.45	45
Fold	0.318 2	270
Output	0.45	135

3.2 光谱带宽对 FOV 传递的影响

由于商用的 LED 光源通常是具有一定光谱带宽的宽光谱光源,因此在中心波长 550 nm 两侧各选取若干波长进行模拟,以观察各色光 FOV 的传递情况。相对于 3.1 中的参数,除添加 510, 530, 570, 590 nm 色光外,其他参数没有变更,结果如图 5 所示。图 5(a)所示的 k 空间

中,偏离中心波长光线的 FOV 被不同程度地切割,偏离中心波长越大的光线的 FOV 被切割得越严重。图 5(b)中,510 nm 光线的 FOV 的右上侧和右下侧的视场被切割的比较严重,约被切割 14%;530 nm 光线的右上侧和右下侧的视场约被切割 2.1%;590 nm 光线的 FOV 的左上侧和左下侧的视场被切割的比较严重,约被切割 11%;570 nm 光线的左上侧和左下侧的视场约被切割 0.9%。对于处于光谱带边缘的 510 nm 与 590 nm 光线,本身对于出射 FOV 的贡献权重较低,并且被切割的是不易被察觉的视场边缘,因此是可以接受的。绿光的光谱较宽,并且是人眼最敏感的光谱段,仅选择绿光进行代表性分析,红光和蓝光得到的结论是一致的,这里不再给出。

图5 多波长传递衍射光波导设计结果。(a) k 空间;(b) 出射 FOV。Fig.5 Multi-wavelength propagation simulation results. (a) k space; (b) Output FOV.

3.3 折射率色散对 FOV 传递的影响

对于光学材料,通常为正常色散材料,即折射率随波长减小。因此,在衍射光波导设计中应考虑折射率色散对设计的影响。本小节中,设置 510, 530, 570, 590 nm 波长对应的折射率分别为 1.538, 1.512 6, 1.508 7, 1.508, 其余与 3.2 中的模拟参数相同,设计结果如图 6 所示。相比较于 3.2 节中的结果,未观察到明显的差别。因此,在实际设计中,折射率色散对于设计的影响较小,可以不予考虑。

3.4 时钟角对光栅位置及尺寸的影响

根据第二节中的理论,光栅的时钟角对于光栅的位置以及各方向的分量存在影响。对于一款衍射光波导片,需要考虑光栅的位置关系以及尺

寸大小,以使其适于实际加工。本小节中,仅对光栅的时钟角以及周期进行调整,其他条件与 3.1 节中相同。图 7 是 40-270-140 时钟角的衍射光波导的设计结果,光栅的具体参数列于表 2。相比较于 45-270-135 时钟角的衍射光波导,耦合入与耦合出光栅的尺寸未发生变化,中继光栅区域趋于方形化。对于光栅的整体尺寸,水平方向的尺寸相同,但垂直方向 40-270-140 时钟角的衍射光波导的高度为 35.4 mm,小于 45-270-135 时钟角衍射光波导的 41.3 mm,主要原因是中继光栅尺寸在垂直方向减小,其尺寸约为 20 mm $\times$ 22 mm。并且,中继光栅的周期增大,由 0.318 2 μm 变为 0.35 μm 。周期增大对加工公差的容忍度更高,更有利于加工^[13]。

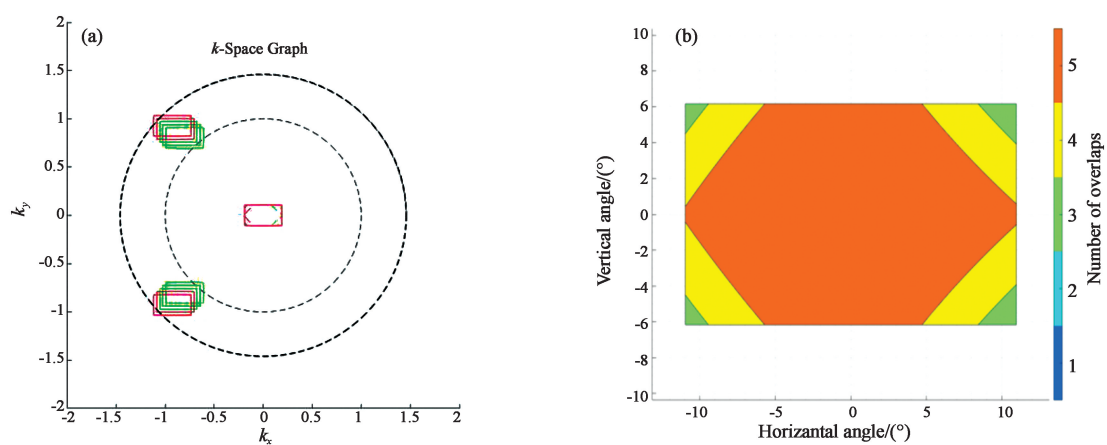


图 6 多波长色散传递衍射光波导设计结果。(a) k 空间；(b) 出射 FOV。
Fig.6 Multi-wavelength dispersion propagation simulation results. (a) k space；(b) Output FOV.

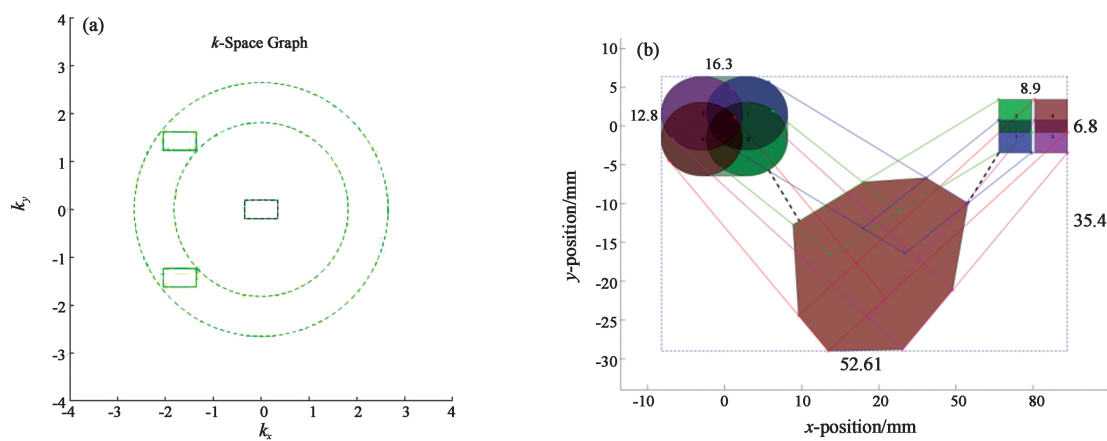


图 7 时钟角为 40-270-140 的衍射光波导的设计结果。(a) k 空间；(b) 光栅位置及尺寸。
Fig.7 40-270-140 clock-angle simulation results. (a) k space；(b) Grating positions and dimensions.

表 2 时钟角为 40-270-140 的光栅参数
Tab.2 Grating parameters of clock-angle at 40-270-140

Grating	Period/ μm	Clock angle/($^\circ$)
Input	0.45	40
Fold	0.35	270
Output	0.45	140

图 8 是 50-270-130 时钟角的衍射光波导的设计结果,光栅的具体参数列于表 3。相比较于 45-270-135 时钟角的衍射光波导,耦合光栅的尺寸未发生变化,耦合光栅水平方向的尺寸增加至 16.8 mm,中继光栅区域在垂直方向趋于条形化,尺寸约为 15 mm $\times$ 30 mm。对于光栅的整体尺寸,水平方向的尺寸相同,但垂直方向 50-270-130 时钟角的衍射光波导的高度为 48.8 mm,大于 45-

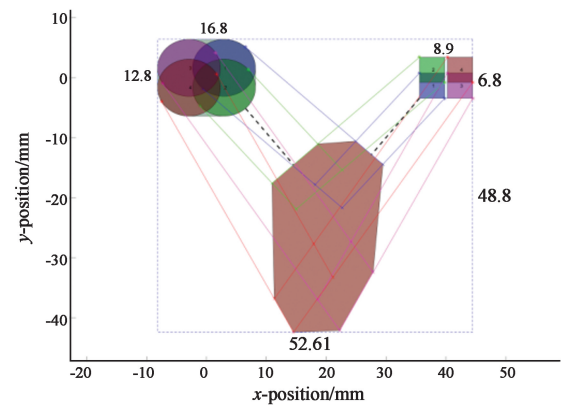


图 8 时钟角为 50-270-130 的衍射光波导的光栅位置及尺寸

Fig.8 50-270-130 clock-angle simulation results of grating positions and dimensions

270-135 时钟角衍射光波导的 41.3 mm,主要原因是中继光栅尺寸在垂直方向增加。并且,中继

光栅的周期减小,变为 $0.293\ 7\ \mu\text{m}$ 。周期减小相当于精度提高,对加工公差的容忍度变差,不利于加工。

表 3 时钟角为 50-270-130 的光栅参数

Tab.3 Grating parameters of clock-angle at 50-270-130

Grating	Period/ μm	Clock angle/ $^{\circ}$
Input	0.45	50
Fold	0.2937	270
Output	0.45	130

耦入光栅的时钟角变为 35° 时,光栅的时钟角为 35-272.5-150,中继光栅的周期为 $0.419\ 1\ \mu\text{m}$ 。耦入与耦出光栅的尺寸不变,中继光栅的尺寸约为 $26\ \text{mm} \times 18\ \text{mm}$ 。中继光栅在水平方向呈扁平化,导致光栅垂直方向尺寸减小,垂直方向的整体尺寸变为 $29\ \text{mm}$ 。由于耦入和中继光栅的距离仅为 $2.7\ \text{mm}$,并不适合实际加工。综上所述,40-270-140 的时钟角是一个较好的适合加工的选择。

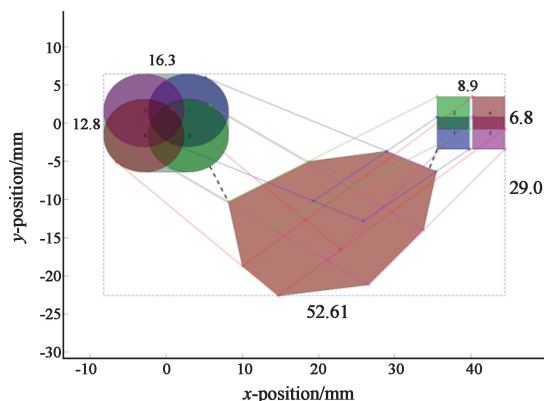


图 9 时钟角为 35-272.5-150 的衍射光波导的光栅位置及尺寸

Fig.9 35-272.5-150 clock-angle simulation results of grating positions and dimensions

表 4 时钟角为 35-272.5-150 的光栅参数

Tab.4 Grating parameters of clock-angle at 35-272.5-150

Grating	Period/ μm	Clock angle/ $^{\circ}$
Input	0.45	35
Fold	0.272 5	272.5
Output	0.45	150

图 10 是根据本工作设计理论设计的一款液晶/聚合物体光栅衍射光波导片的正交偏振光显示图像。体光栅通过多光束全息曝光由液晶/光敏单体等材料组成的光敏混合物制备,左侧长方形区域是耦入光栅区域,负责将投影信息耦入衍射光波导;中间不规则光栅区域是中继光栅区域,负责将投影光线转折至耦出光栅区域,并进行光瞳的水平方向扩展;右侧方形区域是耦出光栅区域,负责对光瞳进行垂直方向的扩展,并将投影信息耦出衍射光波导,在人眼前形成虚拟图像供人眼观察。

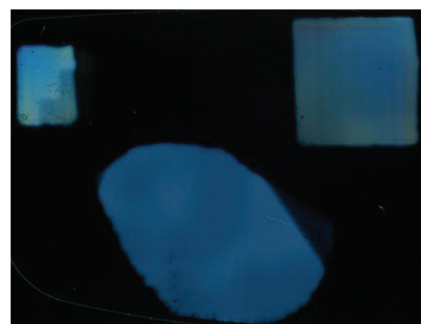


图 10 一款液晶/聚合物体光栅衍射光波导片的正交偏振光显示图像

Fig.10 Cross-polarization image of a liquid crystal/polymer volume grating diffraction waveguide

本工作利用 1.51 折射率的基底通过简单的周期改变可以实现近 30° 视场,与 Hololens 1 代的结果基本持平^[1]。这里只给出 25° 的设计结果, 30° 视场的设计原则是一致的,通过改变光栅周期就可以实现,这里不再赘述。本工作中的设计方案可以使最终的衍射光波导的结构更加轻薄化,适合于全息曝光液晶/光敏单体混合物制备,流程简单,加工方便^[14-16]。并且,有望实现光学塑料基底,进一步减轻衍射光波导的质量^[17]。本文给出的是基于第 2 小节的设计理论进行的衍射光波导片的设计性研究,这里只给出光栅的外形尺寸、相对位置和周期等设计参数。具体的光效以及均匀性优化研究,将在光线追迹软件 Zemax 中进行,这里不进行具体讨论。

4 结 论

本工作基于波矢 k 空间理论在 Matlab Runtime R2019a 中设计了一款对角视场角 25° 的衍射光波导片, 衍射光波导水平视场 21.92° , 垂直视场 12.33° 。设计结果表明, 当使用宽光谱光源

时, 光谱带边缘波长的视场存在切割, 对显示效果影响不大, 衍射光波导片适用于宽光谱光源。波导基底折射率色散对衍射光波导设计的影响可以忽略。时钟角为 40° - 270° - 140° 时, 各个光栅区域位置及尺寸合适, 适合于实际加工。在下一步工作中, 将讨论设计的具体实现方式以及衍射光波导片的显示特性。

参 考 文 献:

- [1] KRESS B C. Optical waveguide combiners for AR headsets: features and limitations [C]//*Proceedings of SPIE* 11062, *Digital Optical Technologies* 2019. Munich: SPIE, 2019: 110620J1.
- [2] INZERILLO L. Augmented reality: past, present, future [C]//*Proceedings of SPIE* 8649, *the Engineering Reality of Virtual Reality* 2013. Burlingame: SPIE, 2013: 86490E.
- [3] BANKS M S, HOFFMAN D M, KIM J, *et al.* 3D displays [J]. *Annual Review of Vision Science*, 2016, 2: 397-435.
- [4] KRESS B C. Digital optical elements and technologies (EDO19): applications to AR/VR/MR [C]//*Proceedings of SPIE* 11062, *Digital Optical Technologies* 2019. Munich: SPIE, 2019: 11062221.
- [5] MAIMONE A, GEORGIU A, KOLLIN J S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 85.
- [6] KRESS B C. Introduction to the SPIE proceeding of AR/VR/MR 2020 [C]//*Proceedings of SPIE* 11310, *Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR)*. San Francisco: SPIE, 2020: 1131001.
- [7] THANNER C, DUDUS A, TREIBLMAYR D, *et al.* Nanoimprint lithography for augmented reality waveguide manufacturing [C]//*Proceedings of SPIE* 11310, *Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR)*. San Francisco: SPIE, 2020: 1131010.
- [8] KRESS B C, CUMMINGS W J. Towards the ultimate mixed reality experience: hololens display architecture choices [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 127-131.
- [9] ZHANG N N, LIU J, HAN J, *et al.* Improved holographic waveguide display system [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(12): 3645-3649.
- [10] MOHARAM M G, POMMET D A, GRANN E B, *et al.* Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 1077-1086.
- [11] LEVOLA T. Diffractive optics for virtual reality displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2006, 14(5): 467-475.
- [12] KRESS B C. *Optical Architectures for Augmented-, Virtual-, and Mixed-Reality Headsets* [M]. SPIE, 2020: 151-173.
- [13] KRESS B C. *Optical Architectures for Augmented-, Virtual-, and Mixed-Reality Headsets* [M]. SPIE, 2020: 175-183.
- [14] LIU M H, DIAO Z H, XUAN L, *et al.* Large angle beam steering using a slanted holographic polymer dispersed liquid crystal grating [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51(38): 385103.
- [15] 杨秋杰, 何志平, 糜忠良. 太赫兹立体相位光栅衍射特性分析[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 605-615.
YANG Q J, HE Z P, MI Z L. Diffraction characteristics analysis of multi-depth phase modulation grating in terahertz band [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 605-615. (in Chinese)
- [16] 樊丽娜, 马军山. 兼具反射和透射模式的共振波导光栅滤波器的设计[J]. 中国光学, 2020, 13(5): 1147-1157.
FAN L N, MA J S. Design of resonant waveguide grating filter with reflection and transmission modes [J].

Chinese Optics, 2020, 13(5): 1147-1157. (in Chinese)

- [17] YOSHIDA T, TOKUYAMA K, TAKAI Y, *et al.* A plastic holographic waveguide combiner for light-weight and highly-transparent augmented reality glasses [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(5): 280-286.

作者简介:



刘明欢(1990—)男,吉林公主岭人,博士,2018年于中国科学院大学长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事全息液晶/聚合物光栅、全息偏振光栅及增强现实显示等方面的研究。E-mail:liuminghuan13@mailsucas.edu.cn