应用光学
Journal of Applied Optics
SCOPUS,CSCD等来源期刊
中文核心期刊、中国科技核心期刊

用于增强现实显示设备的表面浮雕光栅元件的设计

谢蕙阳 牟达 张悦 李堂 夏鹏宇

Design of surface relief lenticular elements for augmented Reality Display Devices

XIE Huiyang, MU Da, ZHANG Yue, LI Tangyue, XIA Pengyu

引用本文:
谢蕙阳, 牟达, 张悦, 等. 用于增强现实显示设备的表面浮雕光栅元件的设计[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 1–9. DOI: 10.5768/JAO202445.000000
XIE Huiyang, MU Da, ZHANG Yue, et al. Design of surface relief lenticular elements for augmented Reality Display Devices[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 1–9. DOI: 10.5768/JAO202445.000000

在线阅读 View online: https://doi.org/10.5768/JAO202445.000000

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

DMD衍射效应及其产生的杂散光分析

Analysis of DMD diffraction effect and its generated stray light

应用光学. 2021, 42(4): 630–635 https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401009

增强现实环境下的CPS虚拟装配系统研究与实现

Research and implementation of virtual assemble system based on CPS under environment of augmented reality

应用光学. 2019, 40(3): 387–392 https://doi.org/10.5768/JAO201940.0301005

AOTF成像光谱仪声光晶体衍射效率研究

Study on diffraction efficiency of acousto–optical crystal in AOTF imaging spectrometer

应用光学. 2018, 39(3): 359–365 https://doi.org/10.5768/JAO201839.0302003

非线性光波导中基波和二次谐波的模场分布研究

Analysis of mode field distribution for fundamental and second harmonic light waves in nonlinear optical waveguide

应用光学. 2017, 38(2): 231–236 https://doi.org/10.5768/JAO201738.0202005

基于光谱合束技术的透射光栅模拟设计

Simulation design of transmission grating based on spectral beam combining teachnique

应用光学. 2017, 38(3): 514–520 https://doi.org/10.5768/JAO201738.0308002

一种提高OLED基底出光效率的亚波长光栅设计

Design of sub–wavelength grating for improving efficiency of OLED substrate

应用光学. 2018, 39(5): 701–706 https://doi.org/10.5768/JAO201839.0505001

关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号：1002-2082 (2024) 03-0001-09

用于增强现实显示设备的表面浮雕光栅元件的设计

谢蕙阳[1,2]，牟 达[1,2,3]，张 悦[1,2]，李堂玥[1,2,3]，夏鹏宇[1,2]

（1. 长春理工大学 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室，吉林 长春 130022；2. 长春理工大学 光电工程学院，吉林 长春 130022；3. 长春理工大学 中山研究院，广东 中山 528400）

摘 要：增强现实（augmented reality，AR）系统是一种将虚拟影像叠加到现实环境的显示系统，光波导是 AR 显示系统的核心元件，可以实现系统的微型化与轻量化。光波导耦合元件衍射效率的高低极大地影响 AR 显示系统的成像质量。为提高 AR 显示系统中耦合元件的衍射效率，该文提出了一种多层光栅叠加的波导结构，基于矢量衍射理论，采用严格耦合波分析法对光栅进行仿真分析。仿真结果显示：单层倾斜光栅的平均衍射效率在 50°视场角范围内达到 60%，3 层光栅叠加的波导结构平均衍射效率达到 85% 以上，较单层光栅衍射效率提高了 25%。分析结果表明，多层光栅叠加的波导结构可以实现更大的视场角与衍射效率，使 AR 显示系统具有更清晰的视场。

关键词：浮雕光栅；衍射效率；严格耦合波分析；增强现实；衍射光波导

中图分类号：TN26 **文献标志码：**A **DOI:** 10.5768/JAO202445.000000

Design of surface relief lenticular elements for augmented Reality Display Devices

XIE Huiyang[1,2], MU Da[1,2,3], ZHANG Yue[1,2], LI Tangyue[1,2,3], XIA Pengyu[1,2]

（1. Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Control and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin, 130022; 2. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin, 130022; 3. Zhongshan Research Institute, Changchun University of Science and Technology, Zhongshan, Guangdong 528400）

Abstract: Augmented Reality (AR) system is a display system that superimposes virtual images on the real environment. Since the optical waveguide can realize miniaturization and light weight, it is the core component of the AR display system. The diffraction efficiency of the optical waveguide coupling element greatly affects the imaging quality of the AR display system. In order to improve the diffraction efficiency of the coupling element in the AR display system, in this paper a waveguide structure with multi-layer superimposed gratings is proposed. Based on the vector diffraction theory, the grating is simulated and analyzed by using the rigorous coupled wave analysis method. Simulation results show that the diffraction efficiency of a single-layer grating reaches 60%, and the diffraction efficiency of a waveguide structure with three layers of gratings superimposed reaches 85% at a field of view of 50°, which is more than 25% higher than that of a single-layer grating. The results show that the multilayer superimposed grating waveguide structure can achieve a larger field of view and diffraction efficiency so that the AR display system has a clearer viewing field.

Key words: relief grating; diffraction efficiency; rigorous coupled-wave analysis; augmented reality; diffractive optical waveguide

收稿日期：2023-08-22； **修回日期：**2023-11-06

基金项目：中山市第九批创新科研团队（GXTD2022010）；中山市第二批社会公益和基础研究项目（2022B2012）

作者简介：谢蕙阳（1999—），女，硕士研究生，主要从事衍射光栅波导研究。E-mail: 2561463836@qq.com

通信作者：牟达（1979—），女，博士，教授，硕士生导师，主要从事现代光学设计、光学测试技术、太赫兹技术等研究。E-mail: muda@cust.edu.cn

引言

随着微纳技术的发展，AR 显示系统逐渐成为近年来的研究热点。由于其可以同时观测虚拟场景与现实环境，被广泛应用在军事领域中的头盔显示与瞄准镜头、医学领域中的手术协同与三维重建以及民用领域的近眼显示设备等[1]，因此，对 AR 显示系统轻量化、微型化的需求逐渐增加。AR 系统光学部分应用的主要技术途径包括自由曲面[2]、波导耦合器与 BirdBath。波导耦合器[3-4]利用波导的全内反射特性进行图像传输，减小了显示系统的体积与重量，克服了 AR 近眼显示系统轻小化的技术难题，成为 AR 显示系统的主要研究方向。

波导耦合器主要包括体全息光栅波导、几何光波导以及表面浮雕光栅波导。几何光波导[5-6]利用光的全反射原理，使入射光线在波导内经数次全反射，到达人眼可视区范围时，通过反射镜阵列实现光线的出射。浙江大学刘辉[7]等人采用一种上层为反射镜阵列、下层无反射镜阵列的双层波导结构，在 400 nm～660 nm 波段范围内反射率为 7%。体全息光栅波导[8-9]利用两束相干光干涉进行记录，当复现光入射时，还原记录光实现光线的出射。Sony[10]公司发布一种新型 AR 显示系统，其中 AR 波导的输入耦合系统采用双面体光栅结构，改善了光斑不均匀问题，并将衍射效率提高至 50%。曾飞[11]等设计的 AR 显示系统，结合了棱镜和衍射光栅的优势，大大提高了系统的衍射效率，该结构衍射效率达到了 66%。目前体全息光栅波导存在视场角较小以及较难实现量产[12]等问题，限制了体全息光栅波导在 AR 系统中的应用。表面浮雕光栅波导利用衍射原理实现光的耦入与耦出，浙江大学曹润苍[13]采用严格耦合波分析法（rigorous coupled wave analysis, RCWA），结合遗传算法对梯形表面浮雕光栅进行设计与分析，最终实现了 60% 的衍射效率。浙江师范大学杨培培[14]对不同倾角的光栅进行叠加分析，得到视场角为 20°、衍射效率为 80% 的光栅结构。综上所述，光波导耦合系统仍存在衍射效率较低的问题。表面浮雕光栅波导[15]利用衍射原理，能多次、多方向耦合输出，实现光束扩瞳，通过使用多层光栅叠加的结构可以获得较大的视场角和衍射效率，同时表面浮雕光栅具有较高的设计自由度，并且可以通过纳米压印等微纳加工技术实现大批量制造，被广泛应用到 AR 显示系统中。

本文提出了一种多层表面浮雕光栅的波导结构，结合严格耦合波分析法，分别对单层表面浮雕光栅波导、双层表面浮雕光栅与 3 层表面浮雕光栅波导进行仿真与分析，通过对表面浮雕光栅的周期选取、占空比、光栅厚度、光栅倾角等参数的设计与优化，最终完成用于 AR 近眼显示系统大视场角、高衍射效率的耦合元件设计。

1 设计理论

1.1 基于波导耦合的增强现实光波导显示系统

增强现实光波导显示系统包括图像源、耦合元件以及光波导 3 个组成部分，如图 1 所示。AR 的图像源是微型显示器，主要有自发光有源光器件如 Micro-LED、投影式光器件如 LCD 与 LCOS、以及基于微机电系统 (MEMS) 技术的数字微镜阵列 (DMD)3 种。耦合元件将图像源信息传输到人眼，主要包括自由曲面、BirdBath 与光栅波导 3 种实现方式。光波从图像源出射，经光学准直镜头准直，通过波导耦合的方式将光耦合到平板玻璃基底中，实现全反射传输。当光传输到人眼可视区域内，再通过波导耦合的方式释放出来。由于波导只参与传输，不参与成像，因此，设置在波导前方的耦合元件决定了 AR 显示系统的成像质量。

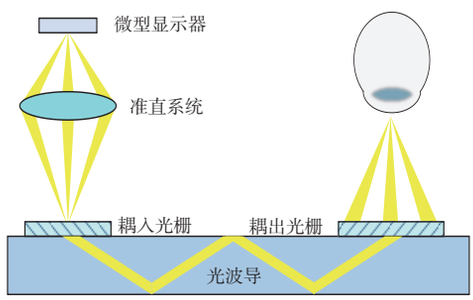


图 1 基于波导耦合的增强现实显示系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of augmented reality display system based on waveguide coupling

用于波导的耦合元件一般采用一维（1D）二元衍射光栅，在一个方向上具有周期性结构，而在另一个方向上无限延伸。调制光在波导中沿着光栅的不同阶传播，并且传播角由光栅方程确定，即：

$$n_1 \sin\theta_1 = n_0 \sin\theta_0 + m\frac{\lambda}{\Lambda} \tag{1}$$

式中：n_1为波导结构部分的材料折射率；n_0为空气

的折射率; θ_0为入射角; θ_1为衍射角; m为衍射级次; λ为入射波长; Λ为表面浮雕光栅周期。

表面浮雕光栅结构如图 2 所示。一维二元矩形光栅的基本结构包括周期、光栅厚度和占空比, 如图 2(a)所示。常用的倾斜表面浮雕光栅结构如图 2(b)所示, 其中二元矩形光栅凹槽以一定角度偏离法线。倾斜表面浮雕光栅打破了光栅的对称性, 并以特定的顺序实现了高衍射效率。在设计中除了考虑光栅周期Λ外, 还必须确定光栅厚度D、占空比f和倾斜角α。

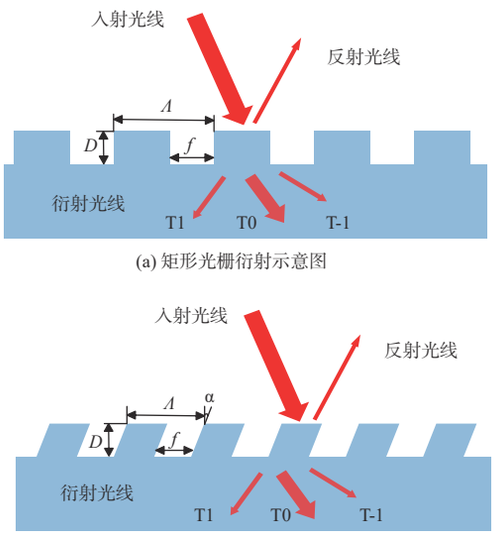


图 2　表面浮雕光栅示意图

Fig. 2　Schematic diagram of surface relief grating

带有图像源信息的光束经过表面浮雕光栅, 以一定的角度在波导中传输, 角度由公式(1)确定。若要实现光在光波导内全反射传输, 则其衍射角θ需要满足:

$$\arcsin\frac{n_0}{n_1} \leqslant \theta \leqslant 90^\circ \tag{2}$$

经表面浮雕光栅输入的光, 在光波导上、下表面以θ角进行全反射传播, 如图 3 所示。图 3 中θ的范围由公式(2)确定, θ的最大值与最小值的差值决定了系统视场角的大小。

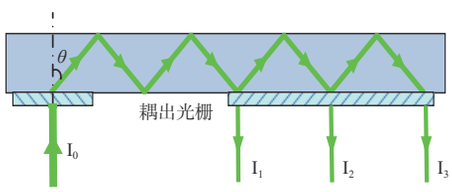


图 3　光波导全反射示意图

Fig. 3　Schematic diagram of optical waveguide total reflection

1.2　理论模型

严格耦合波分析[16-17]是一种基于麦克斯韦方程组, 在光栅区域通过傅里叶展开, 对电磁场进行数值计算的矢量衍射理论, 其精度只依赖于展开谐波数的数量。

图 4 为二元衍射光栅示意图。图 4 中, 区域 I 为空气, 折射率为n_0, 光线以入射角θ_0入射到光栅界面, 光栅衍射一级的光栅角为θ_1; 区域 II 为光栅的玻璃波导基底, 折射率为n_1; 区域 III 为光栅与空气周期交替处, 由折射率不同的两种介质按划定的比例组成。图 4 中一组光栅与另一组光栅的距离用光栅周期Λ表示, 同时用占空比f表示光栅的脊占整个光栅的百分比, 即空气折射率与光栅折射率的交替情况, 光栅厚度D表示区域 II 部分沟槽的深度。

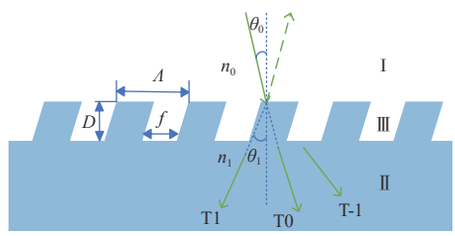


图 4　二元衍射光栅示意图

Fig. 4　Schematic diagram of binary diffraction grating

针对光栅区域 III, 相对介电常数为周期性展开, 用下式表示:

$$\varepsilon(x) = \sum_h \varepsilon_h \exp\left(\mathrm{j}\frac{2\pi h}{\Lambda}\right) \tag{3}$$

式中: ε_h为光栅区相对介电常数的第 h 级傅里叶分量。针对简单的具有交替折射率 n_1、n_2 的矩形光栅, 傅里叶分量的谐波表达式分别为

$$\varepsilon_0 = n_1^2 f + n_0^2(1-f) \tag{4}$$

$$\varepsilon_h = \left(n_1^2 - n_0^2\right)\frac{\sin(\pi h f)}{\pi h} \tag{5}$$

式中, ε_h为该周期结构的相对介电常数在当前区域的平均值。通过麦克斯韦方程组计算出区域 I 和区域 II 电磁场的解, 对每层光栅的介电常数和电磁场进行傅里叶级数展开并建立耦合波方程组, 结合电磁场边界条件求解各级衍射波的振幅系数, 最终可求得光栅的衍射效率[18]。第 m 级反射光衍射效率$\eta_{r,m}$与透射光衍射效率$\eta_{t,m}$通过下式计算:

$$\eta_{r,m} = R_m R_m^* \mathrm{Re}\left(\frac{k_{1,m}}{k_{1,0}}\right) \tag{6}$$

$$\eta_{t,m} = T_m T_m^* \mathrm{Re}\left(\frac{k_{2,m}}{k_{2,0}}\right) \tag{7}$$

式中：R_m和T_m为反射光和透射光的振幅；R^*_m和T^*_m为R_m和T_m的共轭；$k_{1,m}$和$k_{2,m}$为区域 I 和区域 II 中第 m 级衍射光在方向 y 的波数；$k_{1,0}$和$k_{2,0}$为入射光在区域 I 和区域 II 内 y 方向的波数。

2　表面浮雕光栅结构仿真

2.1　单层表面浮雕光栅设计与优化

光栅是波导耦合器显示系统的重要组成部分。由于倾斜光栅 1 级的能量利用率高并且具有较高的设计自由度，因此本文耦合元件采用倾斜光栅结构。设计波导耦合光栅时需要考虑[19]：1）第一级透射光的衍射角应满足全内反射条件；2）为了避免杂散光，耦合光栅周期不应高于第一级衍射级的 TIR；3）耦合光栅的衍射效率不受入射角的影响。为了满足以上条件，需要对光栅周期的范围进行计算，即：

$$\Lambda_{\max}=\frac{\lambda}{\sqrt{n_0^2-n_0^2\sin^2(\theta_0)}-n_0\sin(\theta_0)} \tag{8}$$

$$\Lambda_{\min}=\frac{\lambda}{\sqrt{n_1^2-n_0^2\sin^2(\theta_0)}-n_0\sin(\theta_0)} \tag{9}$$

设计光栅的入射波长范围为 500 nm～700 nm，由式(8)和式(9)得到光栅周期的范围为340 nm ⩽ Λ ⩽ 600 nm。倾斜表面浮雕光栅的初始参数如表 1 所示。

表 1　单层表面浮雕光栅参数

Table 1　Parameters of single-layer surface relief grating

参数	背景折射率	波导折射率	波导宽度/μm	光栅厚度/μm	光栅周期/μm	占空比	光栅倾角/(°)
数值	1	1.832 5	5	1	0.5	0.5	30

表 1 中，背景折射率表示空气折射率，设置为 1，波导折射率为基底的材料折射率。波导结构材料的折射率与衍射光栅最大视场角的关系如图 5 所示。从图 5 可看出，光波导折射率与视场角近似呈正比，考虑玻璃材料加工成本与生产频次，选取折射率为 1.832 5 的 H-ZLAF53 玻璃材料，此时波导最大视场角为 50°，与微型显示器匹配。光波导折射率与最大视场角关系[20]可表示为

$$\mathrm{FOV}=2\arcsin\left(\frac{n_1-n_0}{2n_0}\right) \tag{10}$$

波导宽度是光栅的结构尺寸，设置为 5 μm。在仿真过程中，主要优化衍射光栅的结构参数，即周期、占空比、光栅厚度和光栅倾角。首先固定占空比、光栅厚度以及光栅倾角 3 个参数，通过对光

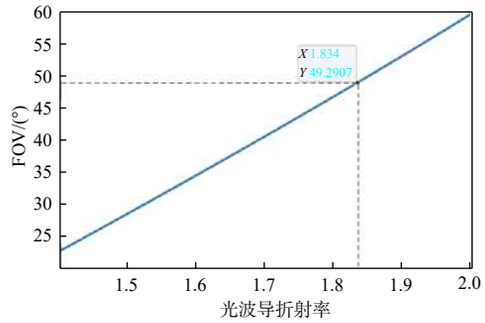
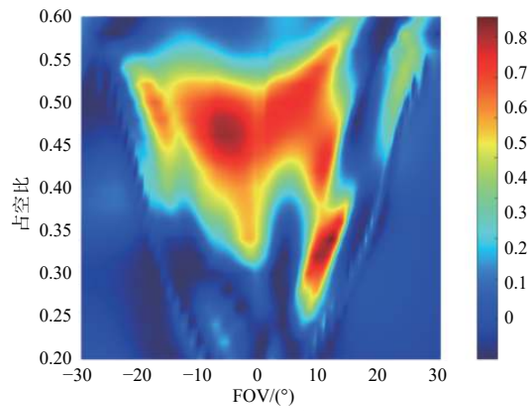


图 5　光波导折射率与最大视场角关系

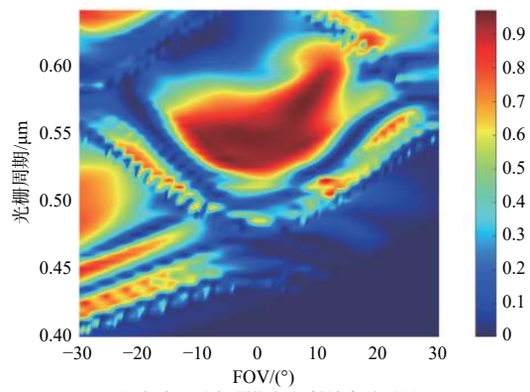
Fig. 5　Relationship between refractive index of optical waveguide and maximum field of view angle

栅周期进行仿真优化，选定在 60°视场角范围内平均衍射效率最高的周期参数作为初始参数，再对占空比、光栅厚度以及光栅倾角进行优化并确定相应参数，以此迭代，直到实现较好的衍射效率，最终得到仿真的光栅参数。

视场角、占空比和光栅周期与衍射效率的关系如图 6 所示。图 6(a)表示在光栅周期、光栅厚度一定的情况下，光栅的占空比、视场角与衍射效



(a) 视场角、占空比与衍射效率关系图



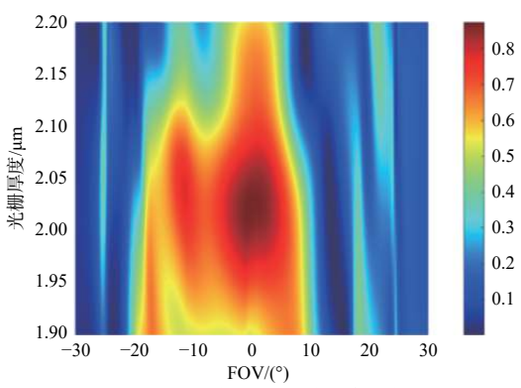
(b) 视场角、光栅周期与衍射效率关系图

图 6　视场角、占空比和光栅周期与衍射效率的关系图

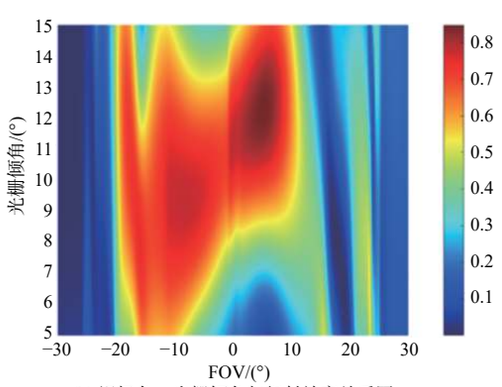
Fig. 6　Diagram of the relationship between field of view duty cycle, grating period and diffraction efficiency

率的关系。由图 6(a)可以看出，光栅占空比在 0.450～0.550 间，20°视场角范围内平均衍射效率在 60% 以上 。图 6(b)表示光栅的占空比、光栅厚度一定的情况下，光栅周期、视场角与衍射效率的关系。由图 6(b)可以看出，光栅周期在 0.470 μm～0.560 μm 之间，视场角 25°范围内平均衍射效率为 60%。

选择光栅周期在 0.470 μm～0.560 μm 范围内进一步模拟，可得周期为 0.550 μm 时光栅的最高衍射效率达到 95%以上。确定光栅周期与光栅占空比参数后，对光栅厚度在 0.3 μm～5.3 μm 范围内进行模拟计算，最终得到在视场角−30°～30°范围内，光栅厚度在 1.9 μm～2.1 μm 之间具有较好的衍射效率。进一步进行仿真，得到光栅厚度、衍射效率与视场角的关系，如图 7(a)所示。考虑光栅加工的可行性，对光栅倾角在−30°～30°范围内进行仿真，得到光栅倾角在 5°～15°范围内的仿真结果，如图 7(b)所示。从图 7(b)可知，光栅倾角为 10°时，单层表面浮雕光栅具有较好的衍射效率。



(a) 视场角、光栅厚度与衍射效率关系图



(b) 视场角、光栅倾角与衍射效率关系图

图 7　视场角、光栅厚度和光栅倾角与衍射效率的关系图

Fig. 7　Diagram of the relationship between field of view, grating thickness, grating angle and diffraction efficiency

通过选取 60°视场角范围内平均衍射效率较高的结构参数得到的仿真结果如图 8 所示。从图 8 中可看出，单层表面浮雕光栅平均衍射效率小于 70%，且在−15°～10°视场角范围内衍射效率差值大于 10%，将导致 AR 显示系统成像区域亮度较低且视场明暗不均，因此，本文提出一种多层光栅叠加的方式改善单层耦合光栅衍射效率低的问题。

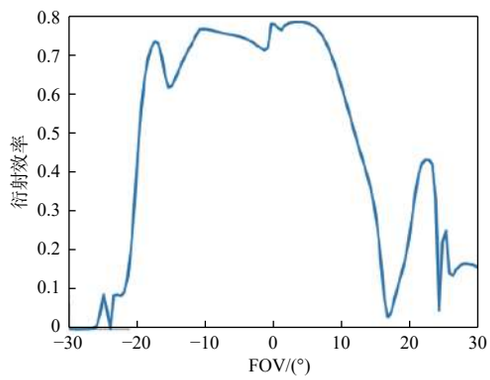


图 8　单层表面浮雕光栅视场角与衍射效率关系图

Fig. 8　Relationship diagram of field of view and diffraction efficiency of single-layer surface relief grating

2.2　双层表面浮雕光栅设计与优化

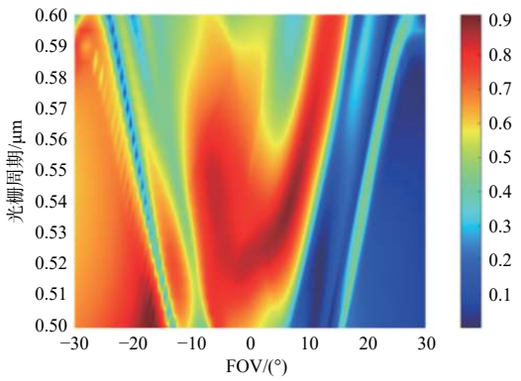
为改善单层表面浮雕光栅衍射效率较低以及视场不均匀的问题，在单层光栅表面叠加一层占空比与光栅周期相同、倾角相反的光栅结构，利用不同倾角的光栅对应视场角不同的原理，将不同倾角的光栅进行叠加，实现扩大视场角的同时提高衍射效率。双层表面浮雕光栅参数如表 2 所示。

表 2　双层表面浮雕光栅参数

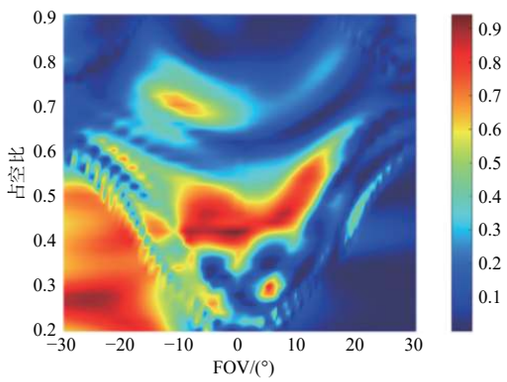
Table 2　Double-layer surface relief grating parameters

参数	光栅厚度 /μm	光栅周期 /μm	占空比	第1层光栅倾角/(°)	第2层光栅倾角/(°)
数值	1.98	0.55	0.5	10	−10

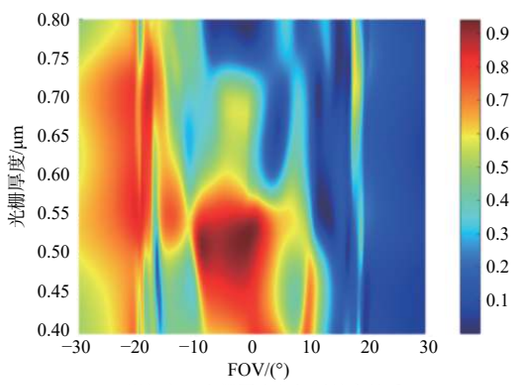
由于光栅结构参数发生改变，光栅衍射特性也随之发生改变，因此，需要对光栅的周期、占空比、光栅厚度以及光栅倾角重新进行优化，进而得到衍射效率较优的双层表面浮雕光栅结构。对双层光栅参数优化后的仿真结果如图 9 所示。图 9(a)为对光栅周期优化后在 0.5 μm ～0.6 μm 范围内的仿真结果，可看出双层光栅结构在周期为 0.52 μm 时具有较好的衍射效率。在光栅周期确定的情况下对占空比进行优化，得到的仿真结果如图 9(b)所示。从图 9(b)可看出，当占空比为 42% 时，在−10°～0°视场角范围内衍射效率达到 90% 以上，但



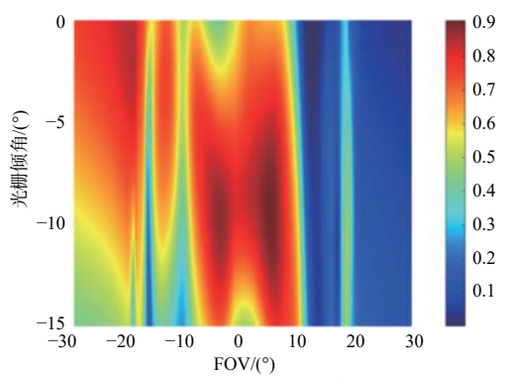
(a) 视场角、光栅周期与衍射效率关系



(b) 视场角、占空比与衍射效率关系



(c) 视场角、光栅厚度与衍射效率关系



(d) 视场角、光栅倾角与衍射效率关系

图 9　双层表面浮雕光栅参数优化后仿真结果

Fig. 9　Simulation results of optimized parameters for double-layer surface relief gratings

由于占空比为 42% 时光栅脊宽为 218.4 nm，较难实现加工，因此最终选取 50% 占空比。图 9(c)和图 9(d)分别为视场角、衍射效率与光栅厚度和光栅倾角关系图，可以看出，光栅厚度为 0.54 μm、光栅倾角为−10°时双层表面浮雕光栅具有较好的衍射效率。综上所述，通过对双层表面浮雕光栅进行优化，最终得到视场角与衍射效率的关系，如图 10 所示。从图 10 可以看出，在 50°视场角范围内光栅平均衍射效率为 65% 以上，最高衍射效率达到 90% 以上，较单层表面浮雕光栅衍射效率提高了 5% 左右。但在视场内仍存在衍射效率偏低且不均匀的问题，因此，提出一种 3 层光栅叠加的方式，改善单层与双层光栅的衍射特性。

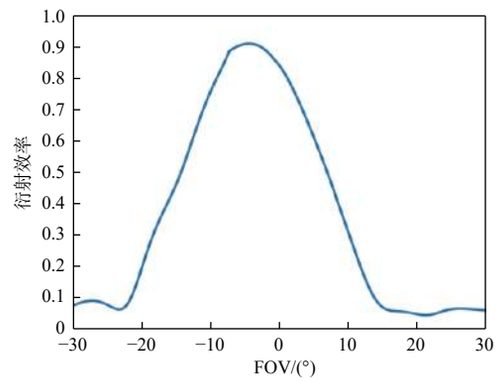


图 10　双层表面浮雕光栅视场角与衍射效率关系图

Fig. 10　Relationship diagram of field of view and diffraction efficiency of double-layer surface relief grating

2.3　3 层表面浮雕光栅设计与优化

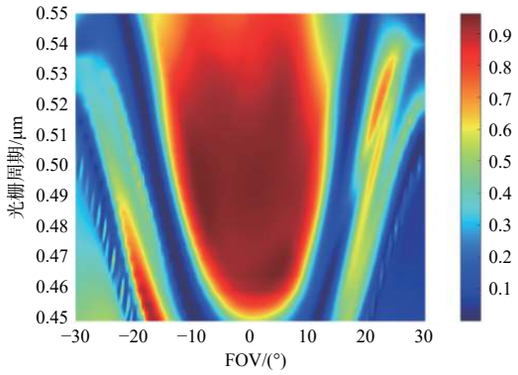
为了进一步提高光栅的衍射效率，在双层光栅仿真模型上叠加一层光栅厚度相同、倾角不同的光栅，建立 3 层表面浮雕光栅的初始模型。在优化光栅倾角时，首先固定第 2 层与第 3 层光栅倾角，对第 1 层光栅倾角进行仿真优化；然后固定第 1 层与第 3 层光栅倾角，对第 2 层光栅倾角进行仿真优化；最后固定第 1 层与第 2 层光栅倾角，对第 3 层光栅倾角进行仿真优化，最终确定衍射效率较好的光栅参数。优化的 3 层表面浮雕光栅参数如表 3 所示。

表 3　3 层表面浮雕光栅参数

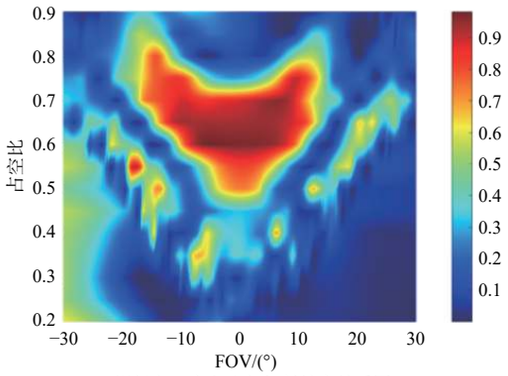
Table 3　Three-layer surface relief grating parameters

参数	光栅厚度 /μm	光栅周期 /μm	占空比	第1层光栅倾角 /(°)	第2层光栅倾角 /(°)	第3层光栅倾角 /(°)
数值	0.6	0.52	0.5	10	−10	10

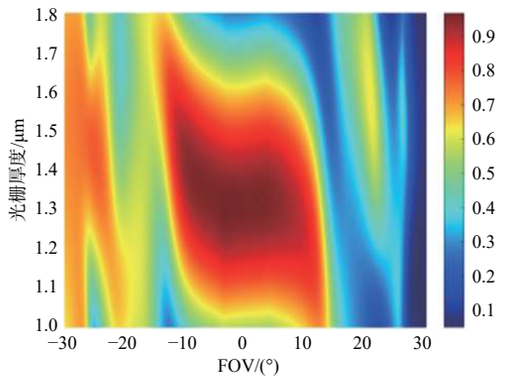
表 3 所示的光栅参数确定后，对光栅的结构参数重新进行优化，优化后的仿真结果如图 11 所示。



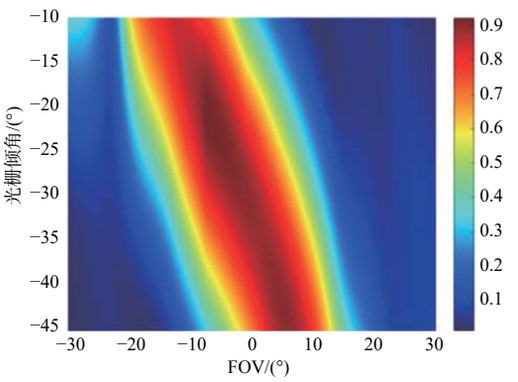
(a) 视场角、光栅周期与衍射效率关系图



(b) 视场角、占空比与衍射效率关系图



(c) 视场角、光栅厚度与衍射效率关系图



(d) 视场角、光栅倾角与衍射效率关系图

图 11　3 层表面浮雕光栅参数优化后仿真结果

Fig. 11　Simulation results of optimized parameters for three--layer surface relief gratings

图 11(a)为光栅周期在 0.45 μm ～0.55 μm 范围内仿真结果，可以看出，3 层表面浮雕光栅周期在 0.5 μm 时视场角内平均衍射效率较高。图 11(b)为占空比仿真结果，可看出占空比为 0.7 时光栅具有较好的衍射特性。对各层光栅厚度依次优化，最终得到的仿真结果如图 11(c)所示。从图 11(c)可以看出，在光栅厚度 1.39 μm 时，20°视场角范围内衍射效率达到 80 % 以上。图 11(d)为光栅倾角在−40°～−10°时的仿真结果，可以看出，光栅倾角为−25°时衍射效率较好。但较大的倾角对加工要求较高，因此，考虑通过调整光栅厚度的方式改变结构参数，重新寻找光栅倾角的最优解。

由于光栅厚度的改变导致原本最优的光栅倾角发生改变，因此，需要对光栅倾角重新仿真，寻找最优倾角。经过多次迭代，对第 3 层光栅倾角进行仿真优化，最终得到如图 12 所示曲线。从图 12 可看出，第 3 层光栅倾角为 10°时视场角区间为 −18°～17°，衍射效率曲线较单层表面浮雕光栅平滑，视场亮度分布均匀。

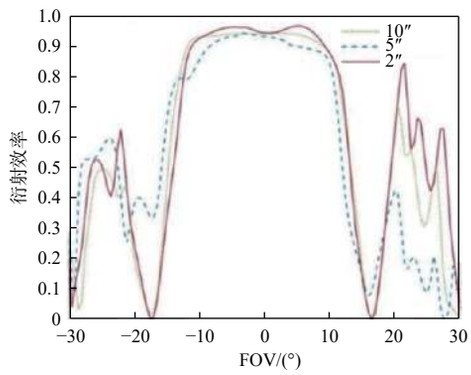


图 12　第 3 层光栅倾角与衍射效率关系图

Fig. 12　Relationship of the inclination angle of the three-layer grating and diffraction efficiency

3　分析

本文对单层表面浮雕光栅、双层表面浮雕光栅以及 3 层表面浮雕光栅进行了设计与分析，图 13 为三种表面浮雕光栅视场角与衍射效率关系图。受波导材料限制，光栅最大视场角为 50°。图 13 中单层表面浮雕光栅在−25°～25°视场角范围内平均衍射效率约为 60%；双层表面浮雕光栅改善了单层表面浮雕光栅视场不均匀的问题，但平均衍射效率较低；3 层表面浮雕光栅最高衍射效率约为 95%，平均衍射效率达到 85% 以上，且衍射效率曲

线平滑，具有较均匀的视场。3 层表面浮雕光栅在 −17°～17°视场范围内的衍射效率接近 95%，可以在人眼可见区呈现均匀明亮的虚拟图像，满足 AR 对视场角以及亮度的需求。

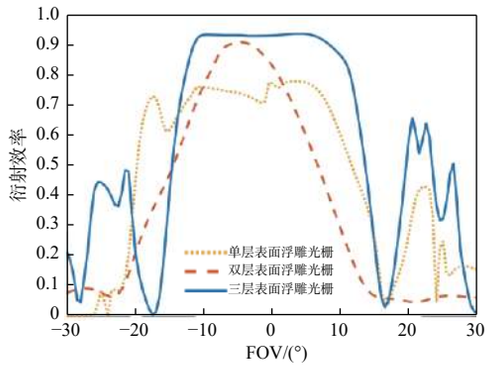


图 13 不同结构表面浮雕光栅视场角与衍射效率关系图

Fig. 13 Relationship between field of view and diffraction efficiency of surface relief grating on different structures

4 结论

提出了一种 3 层表面浮雕光栅的耦合光栅结构，将它作为 AR 显示系统的输入与输出耦合光栅，可有效提高系统的衍射效率。首先，利用 RCWA 讨论了表面浮雕光栅的结构参数与衍射效率的关系，并根据关系图对单层表面浮雕光栅的各结构参数进行扫描，寻找最优解。然后在单层光栅基础上叠加光栅并进行扫描优化，最终选取 3 层光栅倾角分别为 10°、−10°以及 10°，实现 20°视场角范围内衍射效率达 90 % 以上，15°视场角范围内衍射效率达 95% 以上。同时，仿真结果表明，3 层表面浮雕光栅结构较单层表面浮雕光栅具有更大的视场角以及更高的衍射效率。因此，多层光栅波导结构设计有助于提高 AR 显示系统的衍射效率和增大视场，并可以通过紫外纳米压印技术实现大批量制造。

参考文献：

[1] XIONG J, HSIANG E L, HE Z, et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives[J]. Light:Science & Applications, 2021, 10(1): 216.

[2] 杨新军, 向艳, 朱标, 等. 一种新颖的智能眼镜光学系统设计方法[J]. 应用光学, 2018, 39(6): 815-820.
YANG Xinjun, XIANG Yan, ZHU Biao, et al. Novel optical system design method for smart glasses[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(6): 815-820.

[3] LEE Y H, ZHAN T, WU S T. Prospects and challenges in augmented reality displays[J]. Virtual Real. Intell. Hardw, 2019, 1(1): 10-20.

[4] RASMUSSEN T. Overview of high-efficiency transmission gratings for molecular spectroscopy[J]. Spectroscopy, 2014, 29(4): 32-39.

[5] CHENG D, WANG Y, XU C, et al. Design of an ultra-thin near-eye display with geometrical waveguide and freeform optics[J]. Optics Express, 2014, 22(17): 20705-20719.

[6] YANG T, JIN G F, ZHU J. Automated design of freeform imaging systems[J]. Light:Science & Applications, 2017, 6(10): 113-122.

[7] 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.

[8] FROMMER A. 11-3: Invited paper: Lumus optical technology for AR[J]. Sid Symposium Digest of Technical Papers. 2017, 48(1): 134-135.

[9] ATAC R, EDEL M. Binocular scorpion helmet-mounted display[J]. SPIE, 2011, 8041: 108-112.

[10] 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.

[11] 曾飞, 张新, 张建萍, 等. 基于棱镜-光栅结构的全息波导头盔显示系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 114-119.
ZENG Fei, ZHANG Xin, ZHANG Jianping, et al. Holographic waveguide head-mounted display system design based on prisms-grating structure[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 114-119.

[12] 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 Yuting, ZHANG Yi, HU Yueqiang, et al. Research progress of optical waveguide components in augmented reality near-eye display devices[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(1): 28-44.

[13] 曹润苍. 基于RCWA方法的表面浮雕光栅波导AR系统设计与优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
CAO Runcang. Design and optimization of surface relief

grating waveguide AR system based on RCWA method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

[14] 杨培培. 基于飞秒激光微纳光刻技术的AR衍射光波导研究[D]. 杭州: 浙江师范大学, 2021.
YANG Peipei. Research on AR diffracted light waveguide based on femtosecond laser micro-nanolithography technology[D]. Hangzhou: Zhejiang Normal University, 2021.

[15] CHENG D, WANG Q, LIU Y, et al. Design and manufacture AR head-mounted displays: A review and outlook[J]. Light:Advanced Manufacturing, 2021, 2(3): 350-369.

[16] MOHARAM M G, GAYLOR T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. JOSA, 1981, 71(7): 811-818.

[17] 陈为, 廖胜. 严格耦合波法计算闪耀光栅衍射效率[J]. 应用光学, 2009, 30(5): 734-738.
CHEN Wei, LIAO Sheng. Rigorous coupled-wave method for diffraction efficiency calculation of blazed gratings[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(5): 734-738.

[18] 石在耀. 应用于全息波导的新型耦合光栅衍射特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
SHI Zaiyao. Study on the diffraction characteristics of novel coupling grating applied on holographic waveguide[D]. Nanjing: Southeast University, 2018:

[19] 韦信宇. 衍射式光波导近眼显示方案的设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
WEI Xinyu. Design of diffractive optical waveguide near-eye display scheme[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[20] CHAO C P, MI L T, ZHANG W B, et al. Waveguide-based near-eye display with dual-channel exit pupil expander[J]. Displays, 2021, 67: 101998-1-10.