

新型波导型准直投影系统中衍射光栅的设计

黄战华, 马云飞*, 尤 勤, 刘泽阳, 蔡怀宇

天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 新型波导型准直投影系统利用衍射光栅,仅使用一块波导板即可完成光束的耦合、扩展和成像,更利于系统集成和小型化,具有很高的研究价值。基于严格耦合波理论建立了新型波导型准直投影系统中衍射光栅的 Matlab 模型,并根据系统对衍射光栅的性能需求,对耦合光栅、扩展光栅和出射光栅的模型进行分析,设计衍射光栅的结构及相关参数。结果表明,采用新型闪耀光栅作为耦合光栅,扩展光栅设计为普通二元光栅和新型二元光栅相结合,采用闪耀光栅作为出射光栅,所得的新型波导型准直投影系统成像均匀,视场为 $24.8^\circ \times 30^\circ$,系统占用空间小、质量轻,可用于集成和小型化的显示器。

关键词 光栅; 波导型准直投影系统; 衍射效率; 二氧化钛薄膜; 严格耦合波理论

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.030501

Design of Diffraction Grating in New Type of Waveguide Collimated Projection System

Huang Zhanhua, Ma Yunfei, You Meng, Liu Zeyang, Cai Huaiyu

Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, Collage of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract A new type of waveguide collimated projection system uses diffraction grating, which can complete the beam coupling, expansion and imaging by only using one waveguide plate. So it is more conducive to system integration and miniaturization, and it has great research value. A Matlab model of the diffraction grating in the new type of waveguide collimated projection system is established based on the rigorous coupled wave theory. According to the performance requirements of the system, the models of the coupled grating, extended grating and exit grating are analyzed, and the structure and related parameters of the diffraction grating are designed. The results show that the new blazed grating is used as the coupled grating, and the extended grating is designed as a combination of traditional binary grating and novel binary grating, while the output grating is a blazed grating. The waveguide collimated projection system is uniformly imaged, whose field of view is $24.8^\circ \times 30^\circ$. The system can be used for the integrated and miniaturized displays with small occupation and light weight.

Key words gratings; waveguide collimated projection system; diffraction efficiency; TiO_2 thin film; rigorous coupled wave theory

OCIS codes 050.1950; 090.2820; 310.6860; 260.1960

1 引言

波导型准直投影系统基于光束在波导板中的全反射传播压缩空间光路,由波导板中内嵌的衍射光栅破坏光束的全反射条件,并出射形成光幕^[1-2]。当前投影平视系统的结构主要有透反式结构^[3]、全息元件结构^[4-7]、回射屏式结构^[8-9]、自由曲面式结构^[10-11]等。大部分的投影平视系统出瞳较小,投影光路复杂,且占用的空间较大,这大大限制了它们的实际应用。波导型准直投影系统具有占用空间小、质量轻、出瞳大等优点,

收稿日期: 2016-11-04; **收到修改稿日期:** 2016-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(61475113)

作者简介: 黄战华(1965—),男,博士,教授,主要从事光电信息处理方面的研究。E-mail: zhanhua @tju.edu.cn

* **通信联系人。** E-mail: mayunfei7950@163.com

可用于集成和小型化显示器,例如战斗机头盔显示器。2013年,BAE system 公司在 一篇专利中报道了一种新型波导型准直投影系统,该系统利用衍射光栅,仅使用一块波导板便完成了光束耦合、扩展、成像等功能,系统更加小型化。新型波导型准直投影系统在军用和民用领域均有广泛的应用前景和很高的研究价值。波导板中内嵌的衍射光栅是新型波导型准直投影系统的核心元件,但上述专利仅定性描述了系统的工作原理,衍射光栅的结构及其相关参数并未给出。

本文介绍了新型波导型准直投影系统的工作原理及工作过程;分析了衍射光栅各个光栅区域的性能需求;基于严格耦合波理论(RCWT)^[12-13],对衍射光栅的衍射效率等特性进行了 Matlab 建模;根据建立的模型分别对耦合光栅、扩展光栅和出射光栅进行仿真实验,确定了衍射光栅的结构、参数、衍射特性等。

2 新型波导型准直投影系统及衍射光栅特性

新型波导型准直投影系统的结构如图 1 所示,该系统的波导板内嵌有衍射光栅,利用衍射光栅的特性传播光束。其中,衍射光栅包括 3 个光栅区域:耦合光栅 G1、扩展光栅 G2、出射光栅 G3。

系统采用有机发光二极管(OLED)发光面板作为图像源,OLED 发出的光束向空间发散,一部分光束通过准直系统(中继镜组)准直整形后,消除像差并以平行光的形式出射到波导板,利用耦合光栅 G1 耦合至波导板中,如图 1(b)中的 A 箭头所示。耦合光栅实现了携带图像信息的准直光束耦合入波导板中并在波导板中全反射向前传播的功能。为了减少光束能量的损失,耦合光栅应具有较高的衍射效率,同时系统成像的均匀性和清晰度要求耦合光栅的衍射效率随着入射角的变化应保持恒定,且应当抑制高阶衍射。耦合光栅的性能需求总结为衍射效率高、恒定,且抑制高阶衍射。

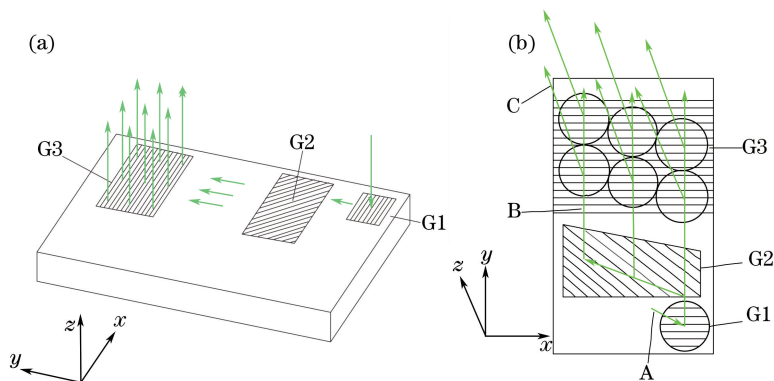


图 1 新型波导型准直投影系统的 (a) 立体视图和 (b) 俯视图

Fig. 1 (a) Perspective view and (b) plan view of new type of waveguide collimated projection system

扩展光栅 G2 的刻线方向和耦合光栅 G1 的刻线方向成一定角度。光束耦合至波导板中后以全反射方式向前传播,当光束传播至扩展光栅时,光束不断接触扩展光栅,由一维传播转化为二维光束带传播,并按图 1(b)中 B 箭头方向继续向前传播。光束在扩展光栅区域传播时,不断扩展并最终形成二维光束带,光束能量沿着光束传播的方向逐渐降低。光束能量不均匀将会影响成像质量,因此,为了满足成像均匀性的需求,扩展光栅的衍射效率应沿着光束的传播方向递增,即沿着 x 轴负方向和 y 轴正方向逐渐增大,同时衍射效率在入射角改变时应保持恒定。

光束带在波导板中继续全反射向前传播,并不断接触出射光栅 G3。出射光栅 G3 破坏光束带的全反射条件,将光束带衍射为平行出射的光幕,如图 1(b)中 C 箭头所示。出射光栅完成了使光束带出射出波导板并最终成像的功能。沿着光束的传播方向,光束不断地衍射出波导板,光束能量逐渐减小,因此,为保证系统成像均匀,出射光栅的衍射效率应沿着光束的传播方向递增,且不随入射角的变化而变化。

OLED 发光面板上的边缘像素点和中心像素点所发出的光以不同的空间角度入射至中继镜组,因此耦合至波导板的平行光束也具有不同的空间角度。不同空间角度的平行光束对应于 OLED 发光面板上相应的像素点,经过波导型准直投影系统后到达人眼位置,从而在人眼视网膜上呈现出 OLED 的原始图像。

3 衍射光栅设计

新型波导型准直投影系统为透视系统,即观察者在接收成像信息的同时又能正常观察外界景物。本系统选用常用的 K9 玻璃作为波导板的基底材料,K9 玻璃对可见光的透射率在 99.7% 以上,折射率为 1.52,能较好地满足系统透视性的要求。光源选择波长为 532 nm 的 TE 偏振光,该波长位于人眼较为敏感波段区域。

3.1 耦合光栅

耦合光栅将中继镜组出射的准直光束耦合入波导板内。耦合光栅应具有抑制高阶衍射、衍射效率高且不随入射角的变化而变化等特性,同时光束耦合入波导板时应只存在 1 级衍射光束,因此,采用闪耀光栅作为耦合光栅。传统闪耀光栅难以满足衍射效率随入射角变化而保持恒定的条件。本研究在传统闪耀光栅表面镀电介质薄膜二氧化钛(TiO_2),讨论其衍射特性,以探求适用于新型波导型准直投影系统的闪耀光栅。

耦合光栅的结构如图 2 所示,其主要由 3 部分组成:上层基底(灰色阴影)材料为金属 Ag,入射光波长为 532 nm 时,其折射率为 $0.125 + 3.339i$;中间层(蓝色阴影)为 TiO_2 薄膜,折射率为 2.5;下层基底材料和波导板的材料一致,为 K9 玻璃,折射率为 1.52。波导板的临界角为 41.1° ,光束在波导板中全反射的角度变化范围设定为 $42^\circ \sim 72^\circ$ 。

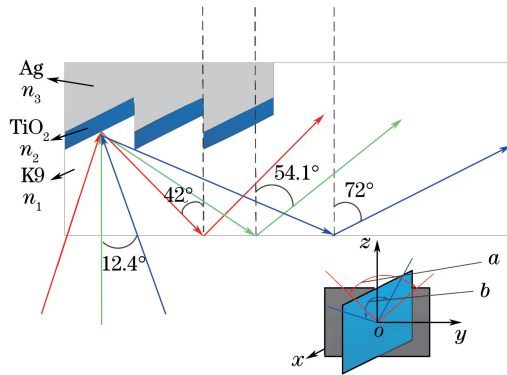


图 2 耦合光栅

Fig. 2 Coupled grating

当入射光束纵向角($b, x-O-z$ 平面内)为 0° 时,光栅方程为

$$n_l \sin \theta_{l,m} = n_1 \sin \theta + m\lambda/\Lambda, \quad (1)$$

式中, m 为衍射级次, l 取 1 时为反射光束, l 取 3 时为透射光束^[14]。当 42° 衍射光束和 72° 衍射光束对应的入射光对称时,可以算出光栅周期为 432 nm。此时横向角($a, y-O-z$ 平面内)的变化范围为 $-12.4^\circ \sim 12.4^\circ$,光束垂直入射时衍射角为 54.1° 。

基于 RCWT,在 Matlab 编程中将光栅分层数设定为 60 层,经过多次尝试后发现,当纵向角和横向角均为 0° ,光栅槽深为 220 nm, TiO_2 薄膜厚度为 108 nm 时,光栅反射 +1 级衍射效率为 90.7%,反射 -1 级衍射效率为 4.3%,反射 0 级衍射效率为 0.007%。该新型闪耀光栅能够抑制高阶衍射,且仅有 +1 级衍射光存在,同时 +1 级衍射光的衍射效率较高,满足系统要求。

设定光束横向角 a 在 $-12.4^\circ \sim 12.4^\circ$ 范围内变化,纵向角 b 在 $-15^\circ \sim 15^\circ$ 范围内变化,此时视场为 $24.8^\circ \times 30^\circ$ 。光栅衍射效率的变化如图 3 所示。

由图 3 可知,横向角在 $-12.4^\circ \sim 8^\circ$ 范围内时,衍射效率变化较为平稳,且都处于 90% 以上,在边缘位置时衍射效率有所降低,但也都在 70% 以上,可以认为光束在 $24.8^\circ \times 30^\circ$ 视场范围内当入射角变化时,衍射效率的变化范围较小,在一定范围内满足衍射效率恒定的条件。因此,传统闪耀光栅表面镀 TiO_2 薄膜后形成耦合光栅,该光栅衍射效率高,且随入射角的变化保持恒定,并且它能够抑制高阶衍射级次,满足系统要求。

3.2 扩展光栅

扩展光栅 G2 用于完成衍射光栅中最重要的功能:光束由一维传播转换为二维成像光束,其转换过程如图 1(b)所示。光束传播至扩展光栅区域并不断接触光栅区域,以一定纵向角入射至扩展光栅,不断地衍射成为二维传播光束带。光束能量在向前传播过程中逐渐降低,为了保证出射光束能量均匀,扩展光栅的衍射

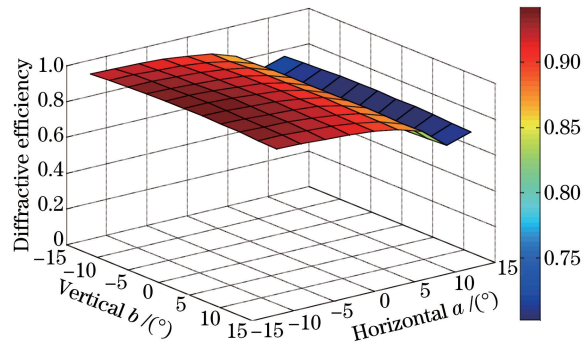


图3 耦合光栅衍射效率

Fig. 3 Diffraction efficiency of coupled grating

效率应沿着光束传播方向递增。同时,对于某一衍射区域,不同入射角度的光入射时,要求衍射效率恒定。因此,扩展光栅的特性为:衍射效率沿着光束传播方向递增;某一区域光栅的衍射效率随入射角的变化保持恒定。

各个光栅区域光栅周期不一致会对成像质量造成影响^[15],为了消除这一影响,扩展光栅、出射光栅和耦合光栅周期均设定为 432 nm。使扩展光栅的刻线方向与耦合光栅的刻线方向成 45°角,并将入射至扩展光栅的光束纵向角设定为 30°~60°,此时满足系统视场的要求。在 K9 玻璃构成的波导板上表面刻画出二元光栅,并在其表面镀 TiO₂ 薄膜。光栅槽深设定为 330 nm,膜层厚度设为 61 nm,光栅占空比设计为 0.502 时,光栅的衍射效率随横向角变化而保持恒定。二元光栅 n_1 为 1.52, n_3 为 1,膜层折射率为 2.5;入射光为 532 nm 的 TE 偏振光,横向角范围为 42°~72°,纵向角为 45°,此时光栅反射 -1 级的衍射效率如图 4 所示。

由图 4 可知,设定好特定二元光栅参数后,随着横向角的变化,光栅的衍射效率变化平缓,可以近似看为光栅的衍射效率随横向角的改变保持恒定,满足系统要求。将纵向角由 30°渐变为 60°,可以得到光栅的衍射效率随空间各个角度的变化情况。

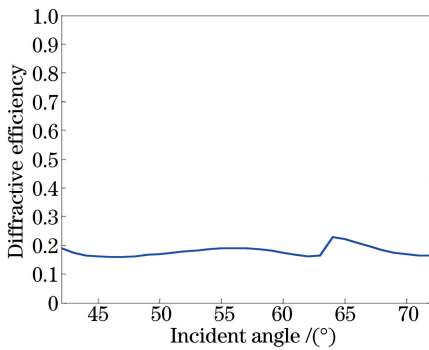


图4 膜厚为 61 nm 时扩展光栅衍射效率

Fig. 4 Diffraction efficiency of extended grating when film thickness is 61 nm

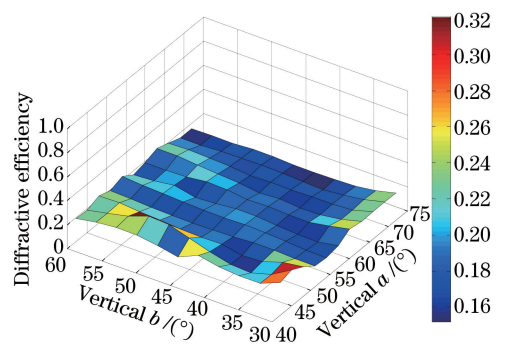


图5 普通二元光栅的衍射效率

Fig. 5 Diffraction efficiency of traditional binary grating

根据图 5 可以看出,二元光栅衍射效率的变化在大部分区域较为平缓,只有在一些特殊的边缘区域较大。因此,可以认为在一定范围内,光栅的衍射效率随空间各个角度的变化较小,满足衍射效率不随入射角变化而变化的性能需求。

扩展光栅除需满足区域衍射效率随空间角度恒定的条件外,还需满足衍射效率沿光束传播方向递增的条件。本研究设计了一种新型的二元光栅,该光栅以金属材料 Ag 作为上基底,下基底为 K9 玻璃,中间层为 TiO₂ 薄膜。制作时只需在 TiO₂ 薄膜镀膜完成后继续镀一层厚度适中的 Ag 即可。普通二元光栅和新型二元光栅的结构如图 6 所示。

新型二元光栅槽深设定为 240 nm,膜层厚度设为 60 nm,光栅占空比设计为 0.502;折射率 n_1 为 1.52, n_3 为 $0.125 + 3.339i$,膜层为 2.5;入射光为 532 nm 的 TE 偏振光,横向角范围为 42°~72°,纵向角为 45°时光栅的衍射效率如图 7 所示。

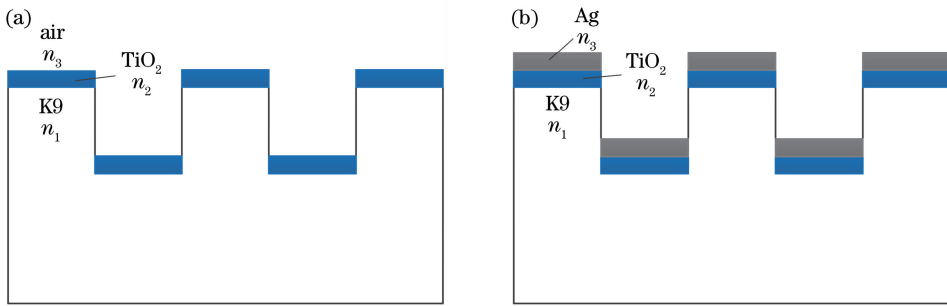


图 6 (a) 普通二元光栅和 (b) 新型二元光栅的结构

Fig. 6 Structures of (a) traditional binary grating and (b) novel binary grating

由图 7 可以看出新型二元光栅的衍射效率基本满足随横向角的变化而保持恒定的要求,同时衍射效率增加一倍,解决了光栅衍射效率沿光束传播方向递增的难题。改变入射光纵向角也可以得到光栅在空间各个角度的衍射效率,如图 8 所示。

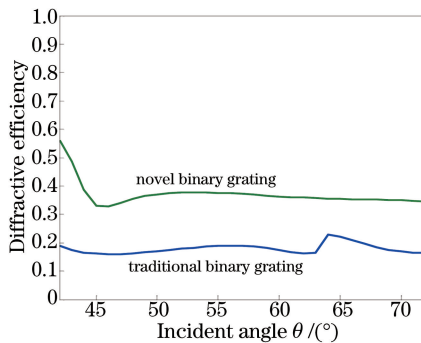


图 7 二元光栅衍射效率随横向角改变的变化示意图

Fig. 7 Change of diffraction efficiency of binary grating with the change of horizontal angle

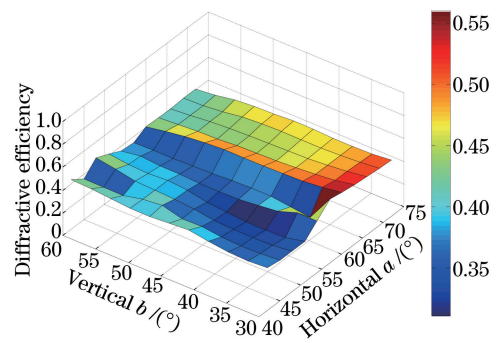


图 8 新型二元光栅的衍射效率

Fig. 8 Diffraction efficiency of novel binary grating

由图 8 可以看出,在横向角 $42^\circ \sim 72^\circ$ 、纵向角 $30^\circ \sim 60^\circ$ 范围内,新型二元光栅绝大部分空间角度的衍射效率保持稳定,能够满足系统要求某一区域光栅衍射效率恒定的条件;同时,相较于普通二元光栅,新型二元光栅的衍射效率提高,能够满足衍射效率沿光束传播方向递增的需求。

综合本小节分析可知,利用二元光栅作为扩展光栅能够实现系统对光栅衍射效率恒定的要求;同时,改变光栅结构可以满足光栅衍射效率沿入射光束的传播方向递增的条件。即普通二元光栅和新型二元光栅的结合能够较好地满足扩展光栅的性能需求。

3.3 出射光栅

光束在扩展光栅 G2 形成二维传播的光,并在波导板中以全反射的方式传播到出射光栅 G3。出射光栅破坏光束在波导板中传播的全反射条件,将光束衍射出波导板,形成光幕,以供人眼观察。对于出射光栅,同样要求在某一区域其衍射效率随着横向角和纵向角的变化保持恒定;同时,光束在不断衍射出波导板后,其能量也逐渐降低,为了满足成像均匀性,要求光栅的衍射效率沿着光束的传播方向递增。

根据系统要求,将出射光栅设计为闪耀光栅,刻线方向和耦合光栅的刻线方向一致,周期也设定为 432 nm ,槽深为 220 nm ,闪耀光栅表面镀 TiO_2 薄膜。出射光栅的横向角为 $42^\circ \sim 72^\circ$ 时,出射角为 $-12.4^\circ \sim 12.4^\circ$,并且横向角为 54.1° 时光束垂直出射波导板。出射光栅的结构如图 9 所示。

假设波导板中光束横向角为 54.1° ,纵向角为 0° ,入射光束为 532 nm 的 TE 偏振光, n_1 为 1.52 , n_3 为 1 ,此时光栅透射 -1 级衍射光的衍射效率随膜层厚度变化如图 10 所示。

由图 10 可知,膜层厚度由 $2 \sim 70 \text{ nm}$ 变化时闪耀光栅的衍射效率呈现先增大后减小的趋势;在 $8 \sim 48 \text{ nm}$ 范围内光栅的衍射效率递增,并且变化较为明显。因此,可以考虑改变光栅的镀膜厚度来满足系统对光栅衍射效率沿着光束传播方向递增的要求。

当光栅纵向角为 0° ,横向角范围为 $42^\circ \sim 72^\circ$,随膜层厚度变化时光栅的衍射效率如图 11 所示。

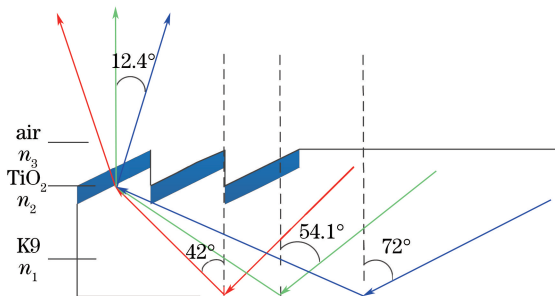


图 9 出射光栅

Fig. 9 Output grating

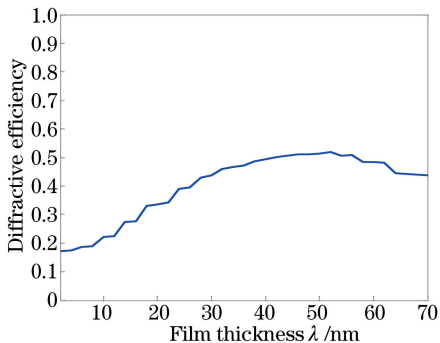


图 10 衍射效率随膜层厚度的变化规律

Fig. 10 Variation of diffraction efficiency with thickness of film

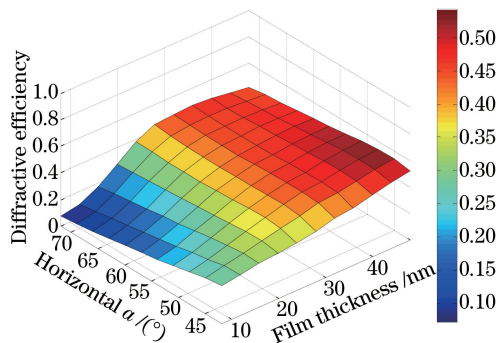


图 11 不同横向角时光栅衍射效率随膜层厚度的变化

Fig. 11 Diffraction efficiency of grating varying with thickness of film at different horizontal angles

由图 11 可以看出,横向角在 $42^\circ \sim 72^\circ$ 范围内时,随着膜层厚度的增加,光栅的衍射效率均递增;膜厚为 $8 \sim 20$ nm 时,光栅的衍射效率随横向角的变化而产生较大的变化,不满足衍射效率恒定的条件;而膜厚为 $20 \sim 48$ nm 时,光栅的衍射效率随膜厚的增加而增加,同时,对于某一膜层厚度,衍射效率随横向角的变化较小,可以视为衍射效率恒定。

当光栅横向角为 54.1° ,纵向角范围为 $-15^\circ \sim 15^\circ$,随膜层厚度变化时光栅的衍射效率如图 12 所示。由图 12 可知,纵向角在 $-15^\circ \sim 15^\circ$ 范围内时,随着膜层厚度的增加,光栅的衍射效率均递增;TiO₂ 薄膜厚度为 $8 \sim 48$ nm 时,光栅的衍射效率随膜厚的增加而增加,同时,对于某一膜层厚度,衍射效率随纵向角的变化几乎不变,可以视为衍射效率恒定。

当 TiO₂ 膜层厚度为 30 nm,横向角在 $42^\circ \sim 72^\circ$ 、纵向角在 $-15^\circ \sim 15^\circ$ 范围内变化时,光栅的衍射效率如图 13 所示。

由图 13 可以得出,当膜层厚度固定时,出射光栅的衍射效率除边缘部分变化较大外,其他空间角度的衍

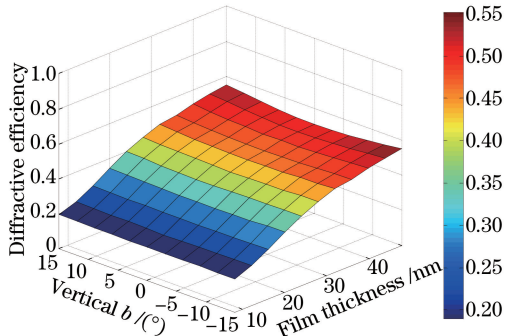


图 12 不同纵向角时光栅衍射效率随膜层厚度的变化

Fig. 12 Diffraction efficiency of grating varying with thickness of film at different vertical angles

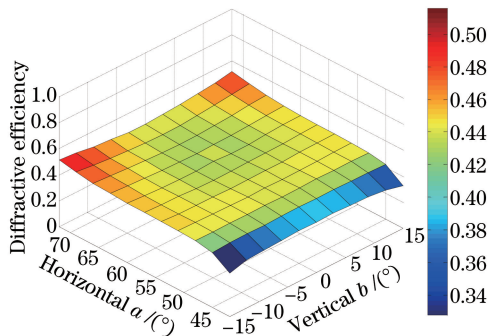


图 13 膜厚为 30 nm 时空间各个角度光栅的衍射效率

Fig. 13 Diffraction efficiency of grating at each angle of space when film thickness is 30 nm

射效率几乎不变,可以视作光栅的衍射效率不随空间角度的变化而变化。

经过以上分析可得:对于一定的膜层厚度,出射光栅的衍射效率随空间各个角度保持恒定;在膜层厚度为 20~48 nm 范围内,光栅的衍射效率随膜层厚度的增加而增加。因此,在闪耀光栅表面镀不同厚度 TiO_2 薄膜而形成的出射光栅的衍射效率渐变且随着入射角的变化保持恒定,满足系统的性能需求。

4 结 论

对新型波导型准直投影系统中的衍射光栅进行了分析,根据其性能需求,建立 Matlab 模型对衍射光栅各个区域进行设计并仿真。衍射光栅周期设计为 432 nm,耦合光栅采用槽深为 220 nm 的新型闪耀光栅,在光栅表面镀 108 nm 厚的 TiO_2 薄膜;扩展光栅采用槽深为 330 nm 的普通二元光栅和槽深为 240 nm 的新型二元光栅相结合的结构,分别对其镀不同膜层厚度的 TiO_2 薄膜;出射光栅为槽深 220 nm 的闪耀光栅,对其镀不同厚度的 TiO_2 薄膜。仿真结果表明:耦合光栅能够抑制高阶衍射,衍射效率较高,且不随空间角度的变化而变化;扩展光栅和出射光栅的衍射效率沿着光束传播方向递增,同时对于任意衍射区域,光栅的衍射效率随空间入射角的变化保持恒定。基于该衍射光栅结构形成的新型波导型准直投影系统成像均匀,系统占用空间小、质量轻,视场可以达到 $24.8^\circ \times 30^\circ$,可用于集成和小型化显示器。

参 考 文 献

- [1] Cameron A. The application of holographic optical waveguide technology to the Q-Sight family of helmet-mounted displays[C]. SPIE, 2009, 7326: 73260H.
- [2] Cameron A. Optical waveguide technology and its application in head-mounted displays [C]. SPIE, 2012, 8383: 83830E.
- [3] Cakmakci O, Rolland J. Head-worn displays: A review[J]. J Displ Technol, 2006, 2(3): 199-216.
- [4] Yang X, Wang Z, Mu G, *et al.* Hybriddiffractive-refractive 60° -diagonal field of view optical see-through head-mounted display[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 116(7): 351-355.
- [5] Lee K Y. Holographic filter with cascaded volume Bragg gratings in photopolymer waveguidefilm[J]. Optics Express, 2010, 18(25): 25649-25656.
- [6] Rash C E. Compact HMD optics based on multiplexed aberration-compensated holographic optical elements[C]. SPIE, 2001, 4361: 89-97.
- [7] Ando T. Head-mounted display using holographic optical element[C]. SPIE, 1997, 3293: 183-188.
- [8] Zhang R, Hua H. Design of a polarized head-mounted projection display using ferroelectric liquid-crystal-on-siliconmicrodisplays[J]. Applied Optics, 2008, 47(15): 2888-2896.
- [9] Zhang R, Hua H. Imaging quality of a retro-reflective screen in head-mounted projection displays[J]. Opt Soc Am A, 2009, 26(5): 1241-1248.
- [10] Cheng D, Wang Y, Hua H, *et al.* Design of an optical see-through head-mounted display with a low f-number and large field of view using a freeform prism[J]. Applied Optics, 2009, 48(14): 2655-2668.
- [11] Talha M M, Wang Y, Cheng D, *et al.* Design of a compact wide field of view HMD optical system using freeformsurfaces[C]. SPIE, 2007, 6624: 662416.
- [12] Moharam M G, Gaylord T K, Grann E B, *et al.* Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(5): 1068-1076.
- [13] Moharam M G, Gaylord T K. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings[J]. Journal of the Optical Society of America, 1982, 72(10): 1385-1392.
- [14] 邢德财. 几种介质光栅的衍射特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2005: 18-20.
- [15] You M, Huang Z H, Cai H Y. Design of waveguide head-up display with embedded gratings[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 091601.