

平显全息组合镜的衍射特性研究*

郭峰^{1,2} 赵建林^{1*} 顾刚²

(1 西北工业大学应用物理系, 陕西 西安 710072)

(2 中国航空工业六一三研究所电子部, 河南 洛阳 471009)

摘要 给出了平显用全息组合镜的衍射效率、水平选择角和带宽的实验测量结果, 并运用耦合波理论进行了分析. 测试结果表明, DCG 是一种制作体积全息图的优良材料, 由其制作的全息组合镜具有优良的透过率和衍射特性.

关键词 平显; 全息组合镜; 衍射效率; 带宽; 水平选择角

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A

0 引言

平视显示器(HUD), 简称平显, 是军用飞机座舱中的一种重要显示设备. 战斗机飞行中, 飞行员通过平显的组合镜来观察飞行信息和外界景物及目标. 目前的先进平显普遍采用全息组合镜以提高显示性能^[1-6]. 由阴极射线管(CRT)发出的携带显示信息的绿光(信号光)经中继系统, 最终由全息组合镜衍射后到达观察眼位. 为获得最大显示亮度(衍射效率), 全息组合镜需要具有适当的带宽(较大的带宽(大于 CRT 带宽))和较高的峰值衍射效率(接近 100%), 信号光的入射角度必须与全息组合镜的峰值衍射角(布喇格角)一致. 另一方面, 飞行员透过组合镜观察外界景物, 为获得更高透过率并降低组合镜呈现的淡粉红色(因反射绿光引起), 需要减小组合镜的带宽. 因此, 全息组合镜只有具有高衍射效率、使用角度下适当的峰值衍射波长(适当的峰值衍射角)和带宽, 才能获得最佳显示效果.

本文从实验上研究了某型号平显中所用的全息组合镜的衍射效率、角度选择性和波长选择性, 采用半导体激光泵浦的固体激光器作为测量光源(波长为 532 nm), 并用氩离子激光器(波长为 514.5 nm)进行了对比测试. 平显全息组合镜中采用了体积全息图, 全息图由重铬酸盐明胶(DCG)干板用氩离子激光(波长 514.5 nm)曝光制作而成. DCG 是制作体积全息图的优良材料, 吸收和散射都很小, 由其制作的全息图衍射效率理论上可达 100%^[7].

1 测量原理

图 1 是使用全息组合镜的平显光学系统示意图, 这里, 全息组合镜作为一个终端显示屏, 实际上是一

块大面积的反射式体全息透镜, 可以将阴极射线管发出的图像信息成像于无限远. 全息组合镜可以是球面的, 也可以是平面的, 本实验测试的是平面型.

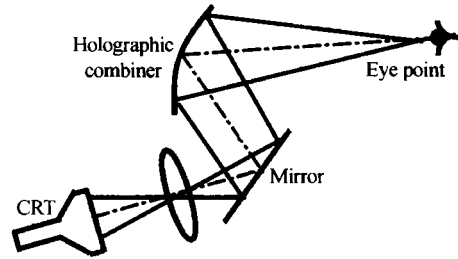


图 1 平显光学系统
Fig. 1 HUD optical system

如图 2 所示, 由激光器发出的细光束经分束镜分为两束, 一束光被光电池 1 接收, 用于监测激光器功率变化; 另一束斜入射到全息组合镜上, 光电池 2 用于接收衍射光和透射光(分别置于透镜前后相应位置).

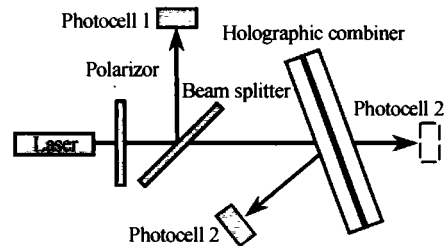


图 2 衍射效率测量光路
Fig. 2 Experimental setup for measuring the diffraction efficiency

接近布喇格角入射时, 全息元件对入射光的衍射、折射和反射如图 3 所示. 细激光束以一定角度

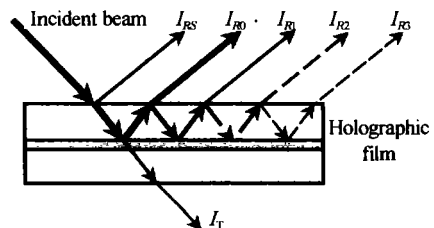


图 3 全息组合镜的多级衍射
Fig. 3 Diffraction of holographic combiner

入射,可以得到多级衍射光,分别为表面反射光 I_{RS} 、主衍射光 I_{R0} 、次级衍射光 I_{R1} 、 I_{R2} 、 I_{R3} 等(该组合镜为无焦光学元件,衍射光方向与反射光方向一致)。

光电池 2 在实际接收时,可以接收到多个光点,这多个光点中心间的距离大致相等,第一个光点较亮,第二个光点最亮,其它各光点能量逐级减弱。在满足布喇格条件情况下,最多可出现五个光点。设入射光 $I_0 = 1$,将数据归一化处理,测得接近布喇格条件时的一组典型数据为: $I_{RS} = 0.05385$, $I_{R0} = 0.8635$, $I_{R1} = 0.04973$, $I_{R2} = 0.002851$ 。按照图 3 的分析,假定此时全息组合镜表面的反射率为 R ,应有

$$\eta = \frac{I_{R0}}{I_0(1-R)^2} = \frac{I_{R0}}{(1-R)^2} \quad (1)$$

式中 η 为衍射效率, $R = I_{RS}/I_0 = 0.05385$, 带入式(1)可得 $\eta = 96.5\%$ 。为了对上述分析做一验证,按图 3 的衍射规律可以推出

$$I_{R_{K+1}}/I_{R_K} = R\eta \quad (2)$$

式中 $K = 0, 1, 2, \dots$, 式(2)表明,后一光点与前一光点光强比值为常数 $R\eta$ (在测量点附近,同一入射角条件下 $R\eta$ 可看作常数)。将 I_{R0} 、 I_{R1} 、 I_{R2} 带入式(2)计算,分别得到 0.0573 和 0.0576,近似相等,但略大于 $R\eta = 0.0520$ (由于光波入射到明胶表面时会发生表面反射,所以实测各级衍射光强度会略大于依照式(2)所计算出的强度)。从上述分析计算可知,在布喇格角附近,按照图 3 所作的分析基本符合实际情况。但在偏离布喇格角后,按式(2)所算出的比值逐渐增大,这时明胶的表面反射对接收到的衍射光波的影响已经较大,不能忽略。

对于不同的入射角度,将 I_{RS} 、 I_{R0} 、 I_{R1} 、 I_{R2} 等和 I_T 相加(归一化数据),发现在布喇格角附近,所有接收到的光强之和 I_{Σ} 接近于 1,最高可达 0.994,而在偏离布喇格角度, I_{Σ} 只有 0.87 左右。观察实验现象也发现,此时产生了明显的散射光。根据耦合波理论,这种现象可以解释为:在满足布喇格条件时,全息膜层对入射光波具有很强的衍射作用,大部分光能在进入膜层过程中就逐渐被衍射,只有极少量光可以最终透过全息膜层,因而吸收和散射都非常小;而在偏离布喇格条件时,衍射作用不显著,光能大部分穿过全息膜层,由于全息膜层内存在着折射率调制,即各处的折射率存在着差异,这种差异导致明胶层对入射光具有显著的散射作用。

2 测量结果

图 4 为测量得到的该全息组合镜对主衍射光的角选择特性曲线,峰值衍射效率为 86.5%,衍射峰值角度约为 48° ,水平选择角约为 8° (此处的水平选择角和衍射峰值角度均为空气中的角度)。按该曲线计算,如扣除入射和出射时表面的反射损耗,全息层的峰值衍射效率大于 99%。

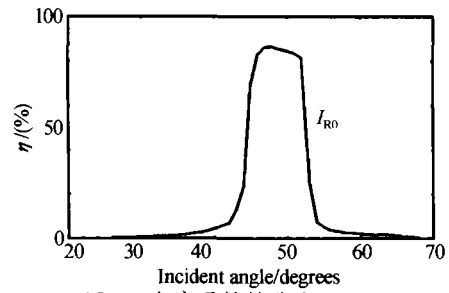


图 4 角选择特性曲线
Fig. 4 Angle selectivity curve

图 5 为用 Lamda40 型分光光度计测得的该全息组合镜在接近布喇格角度条件时的透过率曲线,峰值波长为 529.8 nm(透过最低处),带宽为 23.3 nm,对白光平均透过率大于 80%。

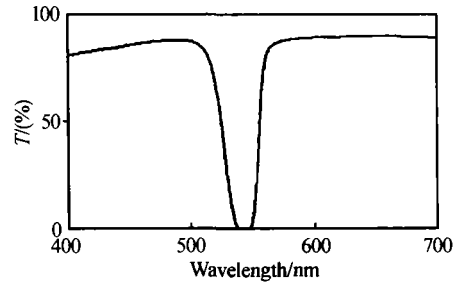


图 5 透过率曲线
Fig. 5 Transitivity curve

表 1 列出了全息组合镜表面上 3×4 阵列采样点(等间隔选取)的角选择特性,其中 A_{11} 点峰值衍射角度及水平选择角均与其它点差异较大,可视作畸值点。计算得到,平均峰值衍射角度 $48^\circ 10'$;平均水平选择角 $8^\circ 1'$ 。

表 1 全息组合镜 12 个采样点的角选择特性

A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}
$49^\circ 45'$	49°	$47^\circ 50'$	$48^\circ 15'$
$47^\circ - 52^\circ 30'$	$45^\circ - 53^\circ$	$43^\circ 30' - 52^\circ 15'$	$44^\circ 30' - 52^\circ$
$(5^\circ 30')$	(8°)	$(8^\circ 45')$	$(7^\circ 30')$
A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}
$48^\circ 15'$	48°	$48^\circ 05'$	48°
$44^\circ - 52^\circ 30'$	$44^\circ - 52^\circ$	$43^\circ 45' - 52^\circ 30'$	$43^\circ 30' - 52^\circ 30'$
$(8^\circ 30')$	(8°)	$(8^\circ 45')$	(9°)
A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{34}
$47^\circ 30'$	$47^\circ 45'$	$47^\circ 45'$	$47^\circ 55'$
$43^\circ - 50^\circ$	$43^\circ 30' - 51^\circ$	$43^\circ 30' - 52^\circ$	$43^\circ 15' - 52^\circ 30'$
(7°)	$(7^\circ 30')$	$(8^\circ 30')$	$(9^\circ 15')$

3 测量结果分析

根据耦合波理论^[8],全息组合镜所用的非倾斜反射体积全息图在满足布喇格入射条件时的衍射效率 η 可表示为一个双曲正切函数的平方

$$\eta = \text{th}^2 \left(\frac{\Delta n d}{\lambda \cos \theta_B} \right) \quad (3)$$

式中 Δn 是记录介质的折射率调制, λ 是记录介质内的波长, θ_B 是布喇格角, d 是记录膜层厚度。由式(3)可知,提高折射率调制、加大膜层厚度、减小再

现波长可以提高衍射效率,理论上衍射效率可达100%.

根据耦合波理论,可以得出水平选择角 $\Delta\theta$ 和带宽 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\theta = \frac{(\pi^2 + \nu^2)^{1/2} \lambda_a}{\pi n d \sin \theta_B} \quad (4)$$

$$\Delta\lambda = \frac{(\pi^2 + \nu^2)^{1/2} \lambda_a^2}{\pi n d \cos \theta_B} \quad (5)$$

式中, λ_a 为空气中的波长, ν 为调制参量. 由式(4)和式(5)可以推导出角度选择性与波长选择性之间的关系

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_a} = \frac{\Delta\theta}{\tan \theta_B} \quad (6)$$

由式(6)可知,水平选择角和带宽相关联(λ 的变化可被 θ 的变化所补偿).

根据折射定律,将表1中明胶膜层外的入射角度转化为明胶膜层内的入射角度,计算出明胶层内的平均峰值衍射角为 29.3° , 水平选择角为 4.11° , $\theta_B = 60.7^\circ$, 半导体激光泵浦固体激光器的输出波长为 532 nm . 由式(6)计算出带宽 $\Delta\lambda = 21.3 \text{ nm}$, 与 Lamda40 型分光光度计测量结果基本符合.

采用氩离子激光器(波长 514.5 nm)测得的数据,计算结果为:明胶层内的峰值衍射角为 32.2° , 水平选择角为 3.86° , 可得 $\theta_B = 57.8^\circ$, 计算得出: $\Delta\lambda = 21.7 \text{ nm}$.

只要测出体积全息图的水平选择角和带宽,由式(6)就可以计算出不同再现波长的衍射峰值角,由于在不同使用角条件下水平选择角和带宽改变不大,所以式(6)可用来估算峰值衍射角.

4 结论

测量了全息组合镜的衍射效率、水平选择角和

带宽,并用耦合波理论对实验结果进行了分析.从测试结果可以看出,DCG 是制作体积全息图的理想材料,由其制作的全息组合镜具有优良的透过率和衍射特性.

参考文献

- 1 Wood R. Holographic and classical head up display technology for commercial and fighter aircraft. *Proc of SPIE*, 1989, **883**: 65 ~ 73
- 2 Bartlett C T. Application of flat panel displays to helmet and head-up displays in cockpit displays. *Proc of SPIE*, 1997, **3057**: 62 ~ 67
- 3 Wisely, Paul L. Wide-angle head-up display system for enhanced and synthetic vision applications. *Proc of SPIE*, 1996, **2736**: 214 ~ 220
- 4 Gu G, Shi Y. DCG holographic optical elements for head-up display. *Proc of SPIE*, 1998, **3559**: 96 ~ 99
- 5 Shi Y, Cao H. Technique of applying computer-generated holograms to airborne head-up displays. *Proc of SPIE*, 1998, **3559**: 108 ~ 112
- 6 刘榴娣,常本康,党长民. 显示技术. 北京:北京理工大学出版社,1993. 321 ~ 349
Liu L D, Chang B K, Dang C M. Display Technology. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993. 321 ~ 349
- 7 于美文,张存林,杨水源. 全息记录材料及应用. 北京:高等教育出版社,1997. 1 ~ 28
Yu M W, Zhang C L, Yang Y Y. Holographic Recording Material And Its Applications. Beijing: Higher Education Press, 1997. 1 ~ 28
- 8 陶世荃,王大勇,江竹青,等. 光全息存储. 北京:北京工业大学出版社,1998. 38 ~ 75
Tao S Q, Wang D Y, Jiang Z Q, et al. Holographic Optical Storage. Beijing: Beijing Industry University Press, 1998. 38 ~ 75

Diffraction Characteristics of HUD Holographic Combiner

Guo Feng^{1,2}, Zhao Jianlin¹, Gu Gang²

1 Department of Applied Physics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2 The 613th Research Institute of China Aviation Industry, Luoyang 471009, China

Received date: 2003-04-30

Abstract The diffraction efficiency, horizontal angle selectivity and bandwidth of a holographic combiner used in a head-up display (HUD) are measured, and the experimental results are analyzed. It is shown that the dichromated gelatin (DCG) is an ideal material for recording volume hologram and the holographic combiner made by DCG has perfect transitivity and diffraction characteristics.

Keywords Head-up display (HUD); Holographic combiner; Diffraction efficiency; Bandwidth; Horizontal angle selectivity



Guo Feng was born in 1973 in Henan Province, China. He graduated from Changchun University of Science and Technology in 1995, and received M. S. degree of optics engineering in the Department of Applied Physics, Northwestern Polytechnical University in 2003. His research interests include holography and manufacture of holographic element.