

白光全息光学元件——视觉显示 反射全息透镜的研究

徐 昆 贤

(上海市激光技术研究所)

提要: 用重铬酸盐明胶介质记录了用于飞机平视显示器的平面离轴反射全息目视显示元件。分析了该显示元件诸如衍射效率、象差、色散、畸变和光学传递函数等显示和成象特性,推荐制备和处理重铬酸盐明胶薄膜的某些重要技术。

Investigation of white light HOE—reflection holographic lens for visual display applications

Xu Kunxian

(Shanghai Institute of Laser Technology)

Abstract: Off-axial reflection holographic visual display elements which records in dichromated gelatin (DCG) deposited on planar substrate of glass has been developed for pilot head-up display (HUD). Important image characteristics such as diffraction efficiency, aberrations, dispersion, distortion and optical transfer function (OTF) etc for the off-axial reflection holographic lens are analysed. Preparation and processing of DCG film and several important techniques for obtaining high quality holographic lens are recommended.

一、引 言

基于衍射的光学原理起源于1871年,那时瑞利曾制造了菲涅尔波带板。然而,一直到盖伯提出波前再现原理和Leith与Upatnieks提出离轴全息术以后,全息光学元件(HOE)才得到迅速发展^[1]。HOE主要优点是重量轻。成本低和制造容易^[2]。然而在选择HOE的适合应用方面必须小心从事,因为它一般有较大色差。此外,薄的元件的

衍射效率低^[3]。

HOE有多种应用场合^[4],本文主要研究用于HUD的目视显示。

二、平面基板反射HOE 记录和显示几何学

本文所研究的平面全息显示元件的记录光路安排以及全息图的记录和显示几何学如图1和图2所示。记录和显示诸参数为:

收稿日期:1985年4月8日。

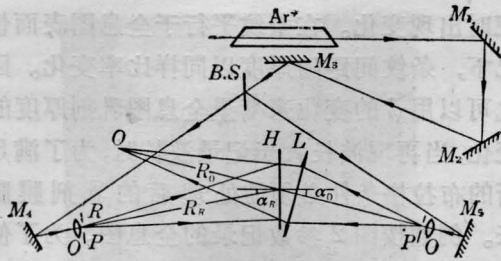


图1 反射HOE的记录光路
 $M_1 \sim M_5$ —反射镜; $B.S.$ —分束器; L —会聚物镜;
 H —全息干板; O —显微镜物镜; P —针孔

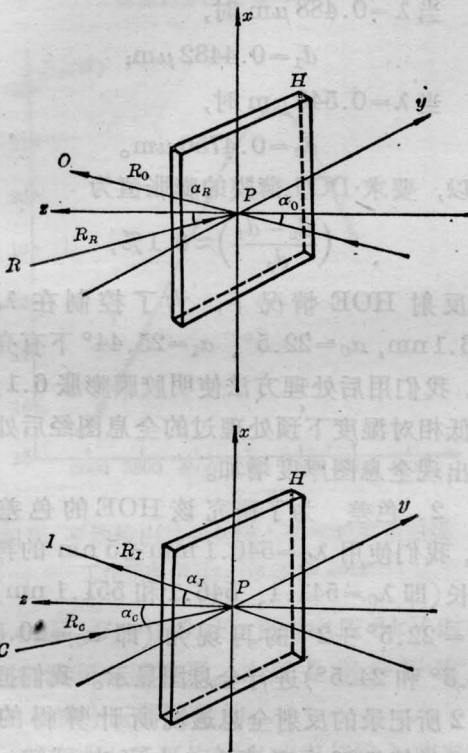


图2 反射HOE记录和显示几何学

记录

$$R_R = 514 \text{ mm}, \alpha_R = -22.5^\circ,$$

$$R_0 = 398 \text{ mm}, \alpha_0 = 22.5^\circ,$$

$$\lambda_R = \lambda_0 = 514.5 \text{ nm},$$

再现

$$R_C = 514 \text{ mm}, \alpha_C = -22.5^\circ,$$

$$R_I = 392.58 \text{ mm}, \alpha_I = 25.44^\circ,$$

$$\lambda_C = 546.1 \text{ nm}.$$

全息图尺寸:

$$2X = 200 \text{ mm}, f'_H = 211.37 \text{ mm}.$$

三、重铬酸盐明胶 (DCG) HOE 的制备和处理

该元件用 514.5 nm TEM₀₀ 模氩激光记录, 并经由 $40\times$ 显微物镜和 15 微米的针孔进行光束滤波。物光束与参考光束的光强比近于 $1:1$ 。全息图平面上的光强, 中心为 100 mJ/cm^2 , 边缘为 75 mJ/cm^2 。最佳曝光时间约为 7 分钟。DCG 干板用带有硬化剂的浓度 $3\sim 5\%$ 的重铬酸铵 $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 敏化, 以重力法制备。 $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 浓度对全息图曝光时间和再现时的布拉格角的漂移有一定影响(在反射HOE情况下会影响再现现象颜色), 而在明胶硬化和显影中使用的硬化剂数量均会影响全息图的效率和噪声。为提高效率和降低噪声, 在曝光后进行水显影之前, 干板先用 Kodak-F9 快速定影液预处理, 然后在 47°C 水温下显影。紧接着用不同浓度的异丙醇三步脱水和用热风快速干燥定影。最后全息图以盖板玻璃用环氧树脂密封。我们研制的反射HOE有高的信噪比(透射率 $> 70\%$) 和高的衍射效率($\eta > 60\%$)。图3为 HUD 反射HOE的实物照片。

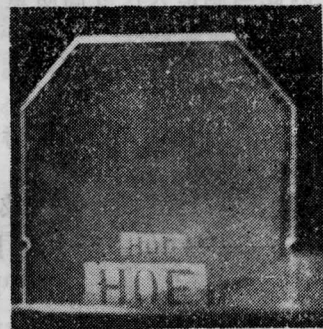


图3 反射HOE的照片

在 DCG 反射 HOE 制备和处理过程中, 影响全息图质量的因素很多。为了获得高效率 and 低噪声的 HOE, 除了有高质量防震台外, 下列因素须认真对待。

1. 热扰动 全息图信噪比和效率与激光器的热扰动和激光噪声有关。为了更好隔

离热源和噪声源,把激光器和全息记录分置在两个房间是必要的。

2. 冷却水 氩激光器冷却水压力变化对氩管冲击是产生激光噪声和振动的又一个可能来源。故有必要加对水压的稳压稳流装置。

3. 激光束热效应 当使用相当高功率的激光时,必须考虑激光的热效应。如功率为5W的直径2mm激光束,在扩束器上的功率密度可达 15.9 W/cm^2 。

如果透镜不清洁,玻璃的吸收和透镜座的散射将会使金属零件的温度显著增加。为了避免热效应,建议把扩束器、显微镜物镜和小孔滤波器用盒子屏蔽以使其温度场达到平衡。

4. 环境条件 涂层暗房一般是较热和干燥,而全息图曝光室则较冷和相对湿度高,为了DCG全息图参数的可重复性,控制室内温度(21°C)和相对湿度($<40\%$)是绝对必要的。

5. 薄膜特性 DCG薄膜特性会影响HOE质量。薄膜的平度、厚度和硬度的不均匀性将会引起全息图整个曝光区域中的不均匀响应。因此当制造大尺寸高质量HOE时要严格控制以上薄膜特性。

四、反射HOE的光学特性

1. 衍射效率 该HOE记录波长514.5nm,再现波长546.1nm, $\lambda_C \neq \lambda_R$ 。因此首先要考虑的是要研究如何设计HOE以使其达到在给定波长和角度时有满足布拉格角的高效率的再现。布拉格角由下式确定:

$$2nd \sin \theta = \lambda$$

式中 d 为条纹间距, θ 为再现光束与条纹平面夹角, λ 为再现波长, n 为DCG的折射率。

在确定体积反射全息图设计参数时,必须考虑由于全息图后处理所造成其厚度的变化,厚度变化会导致条纹间距 d 在记录和再

现时出现变化。在条纹平行于全息图表面情况下,条纹间距随厚度以同样比率变化。因此可以用 d 的变化来衡量全息图乳剂厚度的变化,当再现波长大于记录波长时,为了满足新的布拉格条件必须使处理后的乳剂膜膨胀。例如按图2参数记录的全息图。为了使在 $\alpha_C = \alpha_R$ 、 $\lambda_C = 546.1\text{ nm}$ 的再现条件下,在 $\alpha_I = 25.44^\circ$ 下能再现一明亮象,根据布拉格方程求得:

$$\text{当 } \lambda = 0.488\ \mu\text{m 时,}$$

$$d_1 = 0.4482\ \mu\text{m};$$

$$\text{当 } \lambda = 0.546\ \mu\text{m 时,}$$

$$d_2 = 0.4756\ \mu\text{m}.$$

所以,要求DCG薄膜的膨胀值为

$$\left(\frac{d_2 - d_1}{d_1} \right) \approx 6.1\%,$$

在反射HOE情况下,为了控制在 $\lambda_C = 546.1\text{ nm}$, $\alpha_C = 22.5^\circ$ 、 $\alpha_I = 25.44^\circ$ 下有亮的象,我们用后处理方法使明胶膜膨胀6.1%。在低相对湿度下预处理过的全息图经后处理会出现全息图厚度增加。

2. 色差 为了研究该HOE的色差特性,我们使用 $\lambda_C = 546.1\text{ nm} \pm 5\text{ nm}$ 的再现波长(即 $\lambda_C = 541.1$ 、546.1和551.1nm)和 $\alpha_C = 22.5^\circ \pm 2^\circ$ 的再现角(即 $\alpha_C = 20.5^\circ$ 、22.5°和24.5°)进行全息图显示。我们把按图2所记录的反射全息透镜所计算得的某些光学特性汇总于表1。由表中可知,当546.1nm再现波长有 $\pm 5\text{ nm}$ 漂移时,成象角 α_I 则有 $25.44^\circ \pm 0.47^\circ$ 的移动。因此该HOE的横向色差($\Delta\alpha_I^0/\Delta\lambda$)为 $0.94^\circ/10\text{ nm}$ 。这就是说,对中心波长为546.1nm的10nm狭带宽上有 0.94° 的色散。因此在白光显示时该色散会使其分辨率受到限制。

3. 畸变 表1还给出HOE的象畸变。位于 yz 平面(弧矢平面)上的 c 点,它垂直于 \overline{cp} 的线状目标,对HOE有 4° 的张角。当用 $\lambda_C = 546.1\text{ nm}$ 波长再现时,它仅张 4.09° 。所以象的弧矢畸变为:

表1 $\lambda_R=514.5\text{ nm}$ 记录的反射 HOE 的显示特性
 ($\alpha_R=-22.5^\circ$, $R_R=514\text{ mm}$, $R_0=398\text{ mm}$, $\alpha_0=22.5^\circ$)

$\lambda_C(\text{nm})$	541.0			546.0			551.0		
	α_0^0	24.5	22.5	20.5	24.5	22.5	20.5	24.5	22.5
$\Delta\alpha_0^0$	2	0	-2	2	0	-2	2	0	-2
α_I^0	22.96	24.97	27.04	23.42	25.44	27.51	23.89	25.91	28.00
$\Delta\alpha_I^0$	0.46	0.47	0.47	0	0	0	-0.47	-0.47	-0.49
M_α	0.005	0	0.035	0.01	0	0.035	0.01	0	0.045
$R_I(\text{mm})$	393.43	393.43	393.43	392.58	392.58	392.58	391.73	391.73	391.73
$ \Delta G (\lambda_C)$	350	852	2028	231	1014	2190	454	1134	2359

表2 在不同 α_C 下的总象差 $|\Delta G|$ 和象斑 (δ_x)

$\alpha_C(^\circ)$	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	22.5	23.5	24.5	25.5	26.5	27.5
$\Delta S(\lambda_C)$					2.31						
$\Delta C(\lambda_C)$	-326	-284	-244	-203	-163	-124	-84	-44	-4.5	+35	+72
$\Delta A(\lambda_C)$	3684	3112	2547	1985	1432	889	350	185	-709	-1230	-1738
$ \Delta G (\lambda_C)$	4012	3398	2794	2190	1597	1015	436	231	716	1246	1812
$\delta_x=x-R_I \text{tg} \alpha_I(\text{mm})$	16.5	11.5	6.5	2	2.5	7	11	15	19	23	27

$$M_\alpha = \frac{\Delta\alpha_C - \Delta\alpha_I}{\Delta\alpha_C} = \frac{4 - 4.09}{4} = 2.25\%$$

当再现角 $\alpha_C=22.5^\circ \pm 2^\circ$ 变化时, 则有:

$$\alpha_C=24.5^\circ, M_\alpha=0.01\%$$

$$\alpha_C=20.5^\circ, M_\alpha=0.035\%$$

因此, 畸变是不对称的。计算还表明: 当目标线段在 x 方向, 象无子午畸变。所以若再现点 c 处为一圆形, 则再现象为一椭圆。

4. 象差 HOE 的象差决定着该系统的分辨率。在 $\lambda_C=546.1\text{ nm}$ 再现条件下, 该

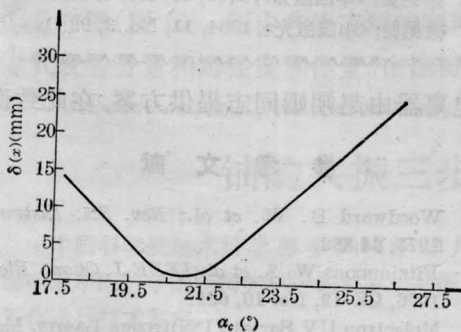


图4 HOE 的象斑 (δ_x) 与 α_C 的关系

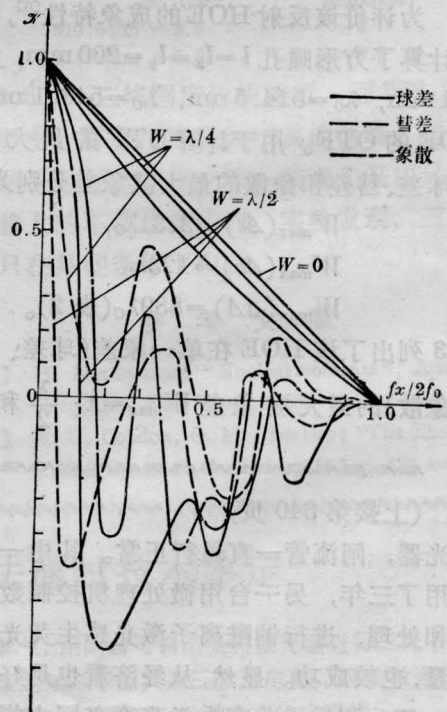


图5 方形瞳孔全息透镜 OTF 截面

表3 反射HOE三级象差的OTF

$\frac{f_x}{2f_0}$	球 差			彗 差			象 散		
	$W_{\max}(\Delta s)$			$W_{\max}(\Delta c)$			$W_{\max}(\Delta A)$		
	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{2}$	λ	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{2}$	λ	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{2}$	λ
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.9	0.0995	0.0982	0.0930	0.027	-0.059	-0.099	0.099	0.099	0.099
0.8	0.1972	0.1890	0.1579	0.017	-0.036	-0.079	-0.111	-0.195	0.181
0.7	0.2927	0.2720	0.1966	0.207	0.027	-0.058	0.122	-0.244	-0.114
0.6	0.1873	0.3517	0.2263	-0.311	0.114	-0.244	-0.328	0.158	-0.320
0.5	0.4828	0.4347	0.2674	-0.192	-0.392	0.150	-0.279	-0.487	0.450
0.4	0.5811	0.5275	0.3394	0.467	0.172	-0.366	-0.492	0.237	-0.480
0.3	0.6830	0.6347	0.4588	0.482	0.0642	-0.136	0.286	-0.570	-0.267
0.2	0.7887	0.7562	0.6319	0.068	-0.146	-0.316	-0.446	-0.781	0.726
0.1	0.8959	0.8842	0.8373	0.249	-0.532	-0.892	0.899	0.899	0.899
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1

HOE 在不同再现角 α_0 时的总象差 $|\Delta G|$ 和象差斑尺寸^[5]见表 2 和图 4。

5. 光学传递函数(OTF)

为评价该反射HOE的成像特性^[6],我们还计算了方形瞳孔 $l=l_x=l_y=200\text{ mm}$, $f'_H=211\text{ mm}$, $\lambda_0=514.5\text{ nm}$, $\lambda_C=546.1\text{ nm}$ 的HOE的OTF。用于计算OTF的最大孔径的球差、彗差和象散的最大波象差分别为

$$W_{\max}(\Delta s) = 2.31\lambda_C,$$

$$W_{\max}(\Delta c) = 123\lambda_C$$

和 $W_{\max}(\Delta A) = 889\lambda_C$ (表 2)。

表 3 列出了该 HOE 在单一象差(球差、彗差和象散)的最大波象差 $W_{\max} = \lambda$ 、 $\frac{\lambda}{2}$ 和 $\lambda/4$

时的 OTF 值。图 5 表示各单一象差的 OTF 曲线族。图中 $f_0 = l/2\lambda f_H$ 为相干照明的光学系统的最大空间频率。

全息透镜的 OTF 分析,对于所要求的 HOE 的象质观点来评价 HOE 的性能和选择全息光学元件的最佳记录参数有着重要的意义。

参 考 文 献

- [1] Close D. H.; *Opt. Eng.*, 1975, **14**, 408.
- [2] Chen C. W.; *Opt. Eng.*, 1980, **19**, 649.
- [3] Weingartner I., Rosenbruch K. J.; *Proc. SPIE*, 1979, **163**, 73.
- [4] Fantone S. D.; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 8, 1121
- [5] 徐昆贤;《中国激光》,1983, **10**, No. 6, 362.
- [6] 徐昆贤;《中国激光》,1984, **11**, No. 3, 92.

(上接第 340 页)

激光器, 闸流管一直运行正常。其中一台已使用了三年, 另一台用微处理机控制数据采样和处理, 进行铈酰离子激光感生荧光光谱测量, 也较成功。显然, 从经济看也是好的。

部分测量承北京大学张合义同志指导监测, 实验部分得到张培林同志的支持, 同位素

预电离器由赵朔嫣同志提供方案, 在此致谢。

参 考 文 献

- [1] Woodward B. W. *et al.*; *Rev. Sci. Instrum.*, 1973, **44**, 882.
- [2] Fitzimmons W. A. *et al.*; *IEEE J. Quant. Elect.*, 1976, **QE-12**, No. 10, 624.
- [3] Molecron UV Series II Nitrogen Lasers, Molecron Corporation, California, 1980, 1~4.