

彩虹全息图色散观察窗的设计与综合*

谢敬辉 杨 辉

(北京理工大学工程光学系, 100081)

提要: 本文提出一种对彩虹全息图的颜色加密方法。文章介绍了基本原理、色度学计算及实验验证过程。

关键词: 彩虹全息图, 色散观察窗, 防伪, 色度学

Design and synthesis of dispersion viewing window rainbow holograms

Xie Jinghui, Yang Hui

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology)

Abstract: Proposed in this paper is a technique for adding more color secrets in rainbow holograms. The key points of this method are that by means of traversing area partition of master hologram and synthesis of the dispersion viewing window, a special chromatic order in reconstructed image will be resulted. In addition, the basic principle, the chroma calculation and the experiments are presented.

Key words: rainbow hologram, dispersion viewing window, guarding against counterfeit, colorimeter

本文提出通过对主全息图的横向面积分割和色散观察窗的综合, 产生预定的特殊色序分布, 达到防伪加密的目的。

一、彩虹全息图色散观察窗的分析

图1(a)中, 设狭缝 S 的位置坐标为 (ξ, ζ) , 参考光的倾斜角为 θ_R , 在 H 上记录 S 的非涅耳全息图。图1(b)是相应的再现光路, 用一束白光沿参考光的共轭方向照明, 倾斜角为 θ_c 。此时在全息图的像空间将形成颜色按彩虹色序排列的色散观察窗。设记录光波长为 λ_0 , 再现光波长为 λ , 根据全息图的物像关系式可导出波长 λ 对应的观察窗 S' 的位置坐标 (ξ_i, ζ_i) :

$$\xi_i = \xi_0 - \zeta_0 [(\lambda_0/\lambda) \sin \theta_c + \sin \theta_R] \quad (1)$$

$$\zeta_i = (\lambda_0/\lambda) \zeta_0 \quad (2)$$

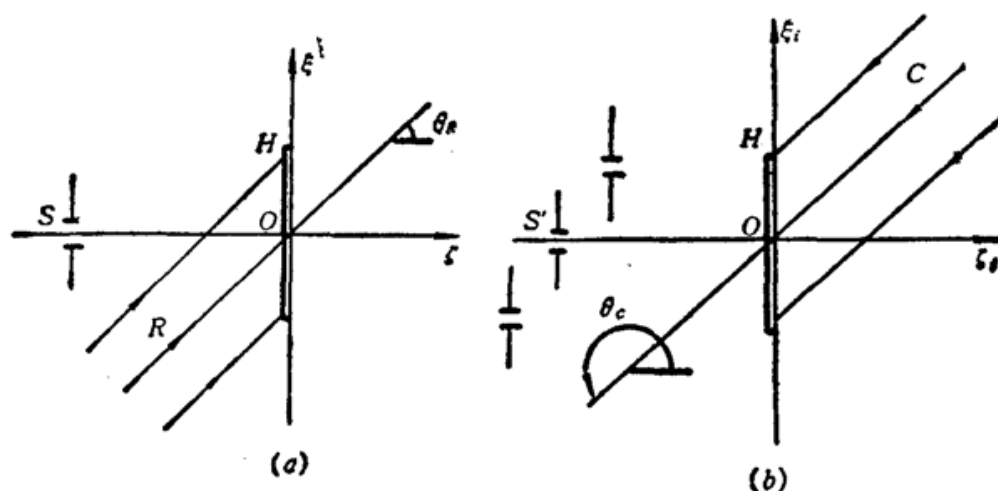


Fig. 1 Formation of dispersion viewing window in rainbow hologram

图 2 给出了 $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$, 狭缝位置坐标在 $-60 \leq \xi \leq 60 (\text{mm})$, $\zeta_0 = -300 (\text{mm})$, $\theta_R = 60^\circ$ 时, 色散观察窗的空间位置分布。图中每一条斜线代表一个位于 ξ_0 的狭缝的再现像的色散曲线, 曲线上每一条短竖线则表示该处透过的中心波长。当眼睛通过这一窗口观察时, 就能看到再现像的相应颜色。

上述分析表明, 当 λ_0 , θ_R , θ_c 等参数一定时, 彩虹全息图色散观察窗的颜色分布将完全由记录时的狭缝位置 (ξ_0 , ζ_0) 来确定。色散观察窗设计的任务就是从预定的色序分布出发, 来计算记录光路中狭缝的初始位置。

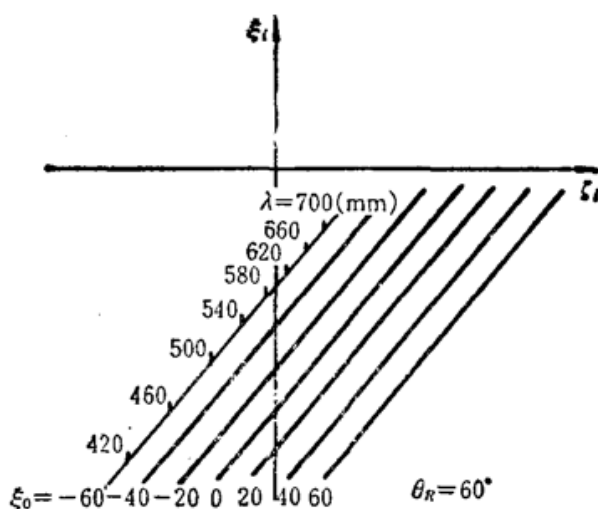


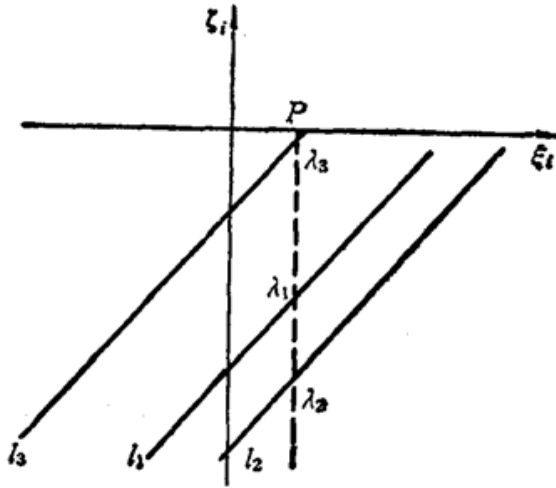
Fig. 2 Dispersion curves of viewing window in rainbow hologram

二、色散观察窗的色度学计算

彩虹全息图的基本原理表明, 观察窗的颜色分布完全决定了再现像的颜色分布。要制造具有特殊色序分布的彩虹全息图, 其实质就是要形成具有特殊色序分布的色散观察窗。我们的方法是: 利用空间位置不同的多个狭缝, 对主全息图作横向面积分割^[1], 达到对色散观察窗按设计要求进行综合的目的。具体的设计任务是, 改变普通彩虹全息图的虹式色序, 形成按红、橙、黄、白(消色)、绿、蓝排列的特殊色序。

设对主全息图作横向面积分割的三个狭缝分别为 S_1 , S_2 , S_3 , 对应的色散曲线分别是

l_1, l_2, l_3 (如图 3)。合成色散观察窗上 P 点是消色点, 也即是说, 当人眼在 P 点观察时, 要求接收到的波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的三原色相加形成等能白色。下面依据这一条件来确定三原色波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 和相应的亮度 Y_1, Y_2, Y_3 。



要确定在 P 点合成等能白色的三原色, 必须遵循两个条件: (1) 三原色是光谱色, 以便简化设计过程; (2) 三原色的相对亮度应符合彩虹全息图的衍射光谱功率密度曲线。

设三原色为光谱色, 波长分别是 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, 对应的色品坐标是 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$, 相对亮度为 Y_1, Y_2, Y_3 , 合成颜色的色品坐标为 (x, y) 。

如果合成颜色和两原色 λ_1, λ_2 的色品坐标以及三原色的相对亮度为已知, 则由色度学基本公式可导出第三种原色 λ_3 的色品坐标为^[2]

$$x_3 = \frac{x(Y_1 + Y_2 + Y_3) - y\left(\frac{x_1}{y_1} Y_1 + \frac{x_2}{y_2} Y_2\right)}{\left(1 - \frac{y}{y_1}\right) Y_1 + \left(1 - \frac{y}{y_2}\right) Y_2 + Y_3} \quad (3)$$

$$y_3 = \frac{y Y_3}{\left(1 - \frac{y}{x_1}\right) Y_1 + \left(1 - \frac{y}{y_2}\right) Y_2 + Y_3} \quad (4)$$

应用上式的前提是第三种原色亮度 Y_3 为已知。但是 Y_3 是不能任意给定的, 它的值一方面要保证 (x_3, y_3) 在光谱轨迹线上, 另一方面还要符合全息图的衍射光谱功率密度曲线。为此, 首先从 (3), (4) 两式消去 Y_3 , 求出在 P 点匹配等能白色的 x_3 和 y_3 的关系式:

$$\frac{\left[\frac{(x-x_1)}{y_1} Y_1 + \frac{(x-x_2)}{y_2} Y_2\right]}{x_3 - x} = \frac{\left[\frac{(y-y_1)}{y_1} Y_1 + \frac{(y-y_2)}{y_2} Y_2\right]}{y_3 - y} \quad (5)$$

为了求解 λ_3 的色品坐标 (x_3, y_3) , 我们令 λ_1 在 (500~550 nm) 波段上, λ_2 在 (400~500 nm) 波段上, λ_3 在 (580~690 nm) 波段上, 因此 λ_3 的色品坐标 (x_3, y_3) 应满足方程^[3]:

$$x_3 + 0.99 y_3 = 1 \quad (6)$$

联立 (5), (6) 两式, 并代入 P 点为等能白色的条件 $(x, y) = \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right)$, 即可求出

$$x_3 = 1 - 0.99 y_3 \quad (7)$$

$$y_3 = \frac{[1 - (x_1 + 2 y_1)] y_2 Y_1 + [1 - (x_2 - 2 y_2)] y_1 Y_2}{[1.99 - 3(x_1 + 0.99 y_1)] y_2 Y_1 + [1.99 - 3(x_2 + 0.99 y_2)] y_1 Y_2} \quad (8)$$

最后, 将 λ_3 的色品坐标代入公式 (3) 或 (4), 即可求出第三原色 λ_3 的相对亮度 Y_3 为

$$Y_3 = \frac{y_3 \left[\left(1 - \frac{y}{y_1}\right) Y_1 + \left(1 - \frac{y}{y_2}\right) Y_2 \right]}{y - y_3} \quad (9)$$

这样, 按公式 (7)~(9) 算出的 (x_3, y_3) 和 Y_3 既符合了 λ_3 是光谱色的条件又满足了在 P 点合成等能白色的要求。但是, $(\lambda_3 - Y_3)$ 是否符合全息图的衍射光谱功率密度曲线却不能保证。为此, 我们首先用实验方法测定一个狭缝全息图对选定白光光源的衍射光谱功率密度曲线(如

图4中曲线A)。图中横坐标为波长 λ ,纵坐标是亮度 Y 。第二步,我们选定 $\lambda_1=546\text{ nm}$,查“CIE 1931标准色度观察者光谱三刺激值”,得 $(x_1, y_1) = (0.27296, 0.71806)$,同时在衍射光谱功率密度曲线上查得 $Y_1=4.3$ 。第三步,让 λ_2 在(400 nm~500 nm)范围取值,抽样间隔 $\Delta\lambda=5\text{ nm}$,查出各个 λ_2 抽样值对应的 (x_2, y_2) 和 Y_2 。第四步,将上述数据代入公式(7)~(9),算出相应的 (x_3, y_3) 和 Y_3 ,同时查出 λ_3 的数值。最后,用逐点描述的方法在图4的衍射光谱功率密度分布图上画出 λ_3 - Y_3 关系曲线(如图中曲线B)。显然,曲线A和曲线B的交点Q就指出了符合上述各个条件的第三原色的波长 λ_3 和亮度 Y_3 。计算结果为

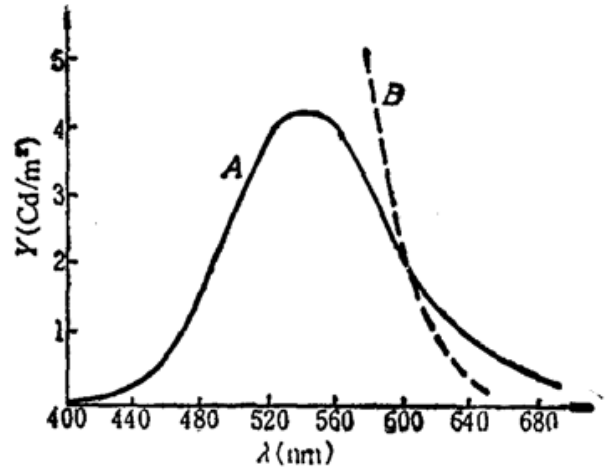


Fig. 4 Curves of diffractive power spectrum of rainbow hologram

$$\lambda_1=546\text{ nm}, (x_1, y_1) = (0.27296, 0.71806), Y_1=4.3$$

$$\lambda_2=440\text{ nm}, (x_2, y_2) = (0.16441, 0.01086), Y_2=0.08$$

$$\lambda_3=607\text{ nm}, (x_3, y_3) = (0.65577, 0.34470), Y_3=1.73。$$

三、狭缝位置坐标的计算

现在利用上节确定的三原色波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 来计算主全息图上三狭缝 S_1, S_2, S_3 的位置坐标 $(\xi_{01}, \xi_{02}, \xi_{03})$ 。为简单起见,可设 S_1 所在位置为坐标原点,即 $\xi_{01}=0$,由公式(1)可得

$$\xi_{i1} = -\zeta_0 \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_1} \sin \theta_c + \sin \theta_R \right) \quad (10)$$

又因在消色点 P 满足 $\xi_{i1} = \xi_{i2} = \xi_{i3}$,于是利用公式(1)和(10)解出

$$\xi_{02} = \zeta_0 \lambda_0 \sin \theta_c \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \quad (11)$$

$$\xi_{03} = \zeta_0 \lambda_0 \sin \theta_c \left(\frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \quad (12)$$

在我们的设计方案中,取 $\lambda_0=633\text{ nm}$, $\zeta_0=-300$, $\theta_R=60^\circ$, $\theta_c=240^\circ$,利用前节确定的三原色波长,算出 $\xi_{01}=0$, $\xi_{02}=69.2\text{ mm}$, $\xi_{03}=-33.6\text{ mm}$ 。

四、实验验证

首先用图1的光路记录狭缝 S 的非涅耳全息图。然后用一台24 V 75 W 碘钨灯作为标准光源,测出狭缝全息图再现像的衍射光谱功率密度曲线。如果在记录彩虹全息图时使用与此相同的一组参数,则测得的曲线就能比较准确地代表彩虹全息图的衍射光谱功率密度曲线。

记录具有特殊色序分布的彩虹全息图,可采用图5所示的两步法。第一步利用设计结果,用位于 $\xi_{01}, \xi_{02}, \xi_{03}$ 的三条狭缝对主全息图 H_M 作横向面积分割(图5a))。第二步,以图1相同的参数,记录彩虹全息图 H_R (图5b))。最后,在标准光源照明条件下观察,当人眼在垂直方向移动时,可以看到再现像按红、橙、黄、白、绿、蓝的色序变化,与设计要求完全一致。

(下转第704页)

然, 微分图像的对比度是不同的。图 3 是彩色图像的实验结果。其中, 图 (a) 示出的是彩色物透明片的黑白照片, 它由红色字母 *S*, 蓝色字母 *H* 和绿色字母 *Y* 组成。当滤波偏振片 P_2 的方位角分别调到 20° 和 45° 时, 其彩色图像微分结果的黑白照片分别由图 3 (b) 和 (c) 示出。由图可知, 在输出图像中呈现出很明显的彩色斑点, 经检验, 这是由构成彩色字母的彩色滤色片上的斑污所致, 这也是图像处理系统在经过零频滤波后易出现散斑噪音的一种必然现象。



Fig. 3 Experimental results for color image edge enhancement

曹永兴、李海峰二同学曾做了部分工作, 作者对此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 于美文, 光学全息及信息处理, 国防工业出版社, 北京, 1984, 250
- 2 母国光 *et. al.* 物理学报, 29 (6), 794 (1980)
- 3 J. Santamaria *et al.*, *Opt. Commun.*, 45 (4), 244 (1983)

(上接第 708 页)

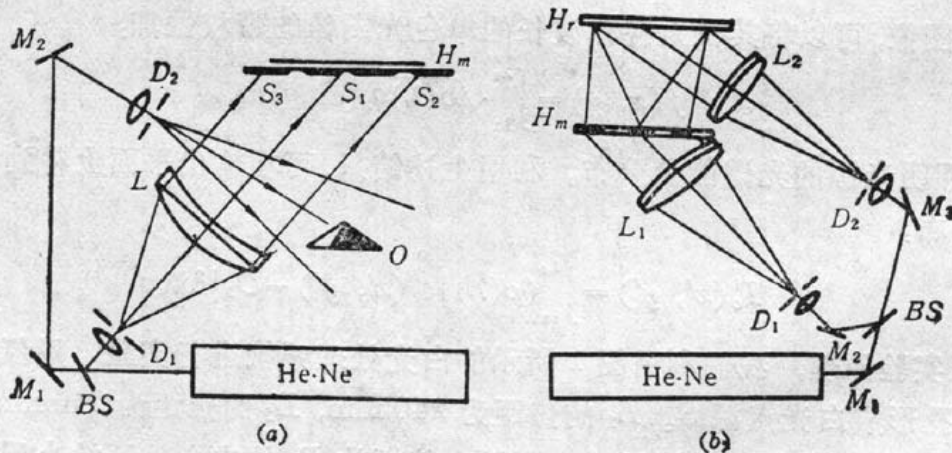


Fig. 5 Recording geometry of rainbow hologram with special chromatic order

参 考 文 献

- 1 谢敬辉, 赵业玲 *et al.*, 光学学报, 8 (5), 410~416 (1988)
- 2 束越新, 颜色光学基础理论, 山东科学技术出版社, 1981, 66~183
- 3 苏大图, 光学测量, 机械工业出版社, 1988, 104~123