

# 利用光致聚合物的真彩色反射全息图

张静方 马春荣 郎恒元

(北京理工大学 工程光学系)

## 提 要

本文用  $\text{Ar}^+-\text{Kr}^+$  激光器的红光(647.1 nm)、绿光(574.5 nm)和蓝光(488.0 nm)分别对准全色的光致聚合物干板制作反射光栅,给出各个反射光栅的光谱透射率曲线,由此可得最小透射率随曝光量、再现波长随曝光量变化的情况。并采用  $\text{Ar}^+-\text{Kr}^+$  激光器全谱线输出和减色滤光片一次曝光成功地拍摄了真彩色反射全息图。本文还讨论了彩色反射全息图再现像的色度坐标和彩色控制。

关键词: 准全色的光致聚合物干板; 反射光栅; 真彩色反射全息图; 色度坐标; 彩色保真度。

## 一、引 言

再现像色彩逼真的真彩色反射全息图是人们渴望已久的,但它的制作主要困难有两:(1)用绿光、蓝光记录反射全息图对记录介质的分辨率要求更高;(2)反射全息图的再现波长随记录介质处理后的膨胀或浓缩而变化。1986年 T. Kubota<sup>[1]</sup> 制作了高质量的夹层真彩色反射全息图。

从1970年起研究光致聚合物以来,对它用于透射体积全息图有详细的报道。直到1985年 Polaroid 公司的 R. T. Ingwall 和 H. L. Fielding<sup>[2]</sup> 才报道了用 He-Ne 红光和 DMP-128 型光致聚合物所制作的反射光栅的光谱透射率。1986年该公司制作了单色光的反射全息图<sup>[3]</sup>。

光致聚合物材料易于制成准全色。为了将国产光致聚合物材料<sup>[4],[5]</sup>用于真彩色反射全息图,我们分别用  $\text{Ar}^+-\text{Kr}^+$  激光器的红光(647.1 nm)、绿光(514.5 nm)和蓝光(488.0 nm)以不同的曝光量对准全色的光致聚合物干板制作反射光栅。由此得到三色光制作的反射光栅在不同曝光量时的光谱透射率曲线、最小透射率随曝光量变化的曲线和反射光栅再现波长随曝光量变化的曲线。

我们用绿光拍摄了再现像为绿色的反射全息图,并采用  $\text{Ar}^+-\text{Kr}^+$  激光器全谱线输出和减色滤光片一次曝光,成功地拍摄了真彩色反射全息图。

为了得到高色彩保真度的彩色再现像,本文还给出了彩色反射全息图再现像的色度坐标公式,并对其中全息图的衍射效率提出一种简化模式,以此为基础讨论了再现像的色彩控制。

## 二、反 射 光 栅

分别用  $\text{Ar}^+-\text{Kr}^+$  激光器的红光、绿光和蓝光制作两束平面波的反射光栅,它们的夹角:

为  $180^\circ$ , 光强比约为 1。对每一单色光, 在同一张干板上的不同区域分别以不同的曝光量制作光栅, 以保证每个光栅的处理工艺完全一致。

实验条件如下: 记录面上红、绿、蓝三色光的功率密度分别为  $5.6 \text{ mW/cm}^2$ 、 $3.06 \text{ mW/cm}^2$  和  $4.58 \text{ mW/cm}^2$ 。室温  $25^\circ\text{C}$ , 相对湿度 52%。所用光致聚合物干板曝光前的光谱透射率曲线如图 1 所示, 其明胶厚度约为  $10 \mu\text{m}$ 。

24 小时后, 测所制光栅的参数。由于没有能直接测其反射衍射光的光谱测试仪, 用 MPS-5000 型分光光度计测量垂直光栅表面入射时的光谱透射率来代替。图 2 为光栅的红、绿、蓝光光谱透射率曲线。每组曲线的标号从小到大代表制作光栅时的曝光量由少到多。

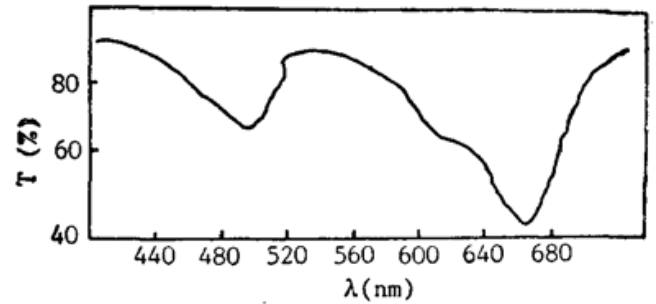


Fig. 1 Percent transmission versus wavelength for the photo-polymer plate

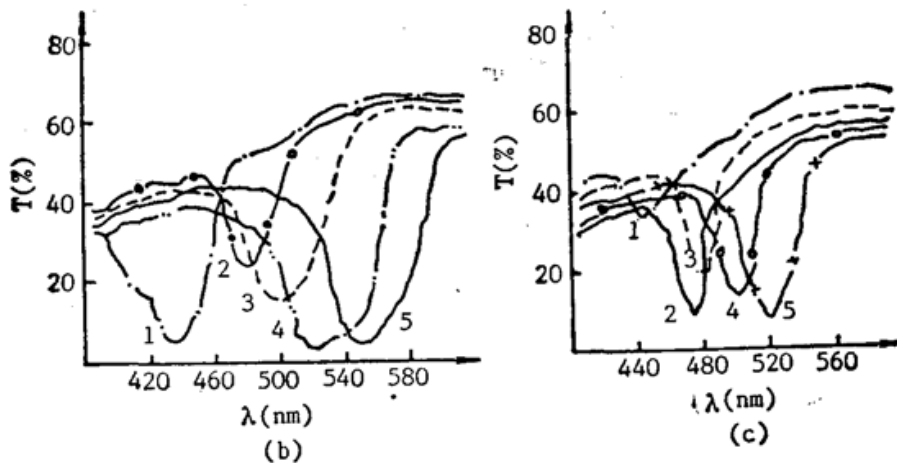
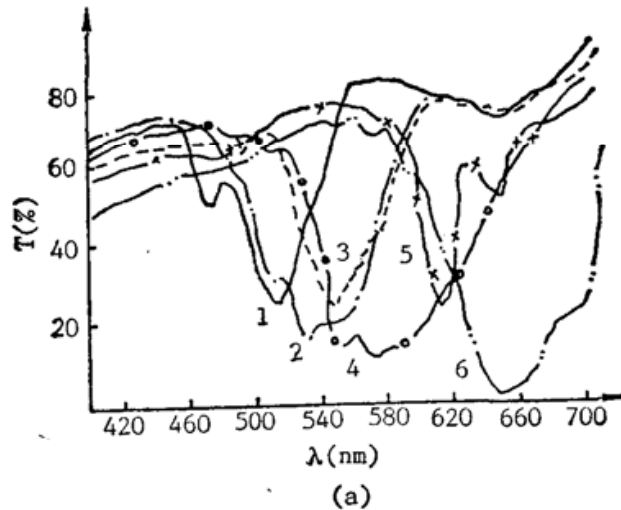


Fig. 2 Percent transmission versus wavelength for the reflection gratings recorded with (a) red light (b) green light (c) blue light

1. 衍射效率和曝光量的关系 本文与文献[2]统一用反射光栅的最小透射率代表其衍射效率。由图 2 中每一条曲线的最小透射率  $T_{\min}$  可见, 曝光量  $E$  达到一定值后, 衍射效率没有大的起伏。本实验条件下, 绿光制作的光栅的空间频率为  $5908 \text{ pair lines/mm}$ , 可认为国产光致聚合物干板的分辨率高于  $5000 \text{ pair lines/mm}$ 。

2. 再现波长与曝光量的关系 在常规处理和一般曝光量下, 由于干板曝光区的小分子

结合成大分子的聚合作用使明胶收缩,再现波长往短波漂移。用红光拍摄的反射全息图再现现象往往呈橙色、黄色。由图 2 中每条曲线最小透射率  $T_{\min}$  所对应的波长可见,光栅的再现波长随曝光量  $E$  的增加而增长。

3. 折射率调制 由图 2 知,反射光栅透射率  $T$  的曲线上端并未达到  $T=1.0$  的位置,说明光通过光栅有散射损失。此时光栅衍射效率可表示为:

$$\eta = 1 - T_{\min} - T' \quad (1)$$

其中  $T'$  为透射率曲线上端与  $T=1$  的差值。

由非倾斜反射体光栅的衍射效率公式,图 2(a) 中曲线 6 的中心波长和光栅的记录条件,可算出光栅的折射率调制  $n_1$  约为 0.03。

### 三、彩色反射全息图

我们用绿光拍摄了再现像为绿色的反射全息图,并采用  $\text{Ar}^+-\text{Kr}^+$  激光器全谱线输出和适当的减色滤光片一次曝光成功地拍摄了彩色龙和红花绿叶两种目标的真彩色反射全息图。图 3 是再现彩色象龙的照片(见封三)。图 4 中曲线 1、2 分别是再现像红花、绿叶的光谱透射率曲线;曲线 3 是单用绿光拍摄的红花绿叶全息图再现绿叶的曲线。以上工作显示了光致聚合物材料在制作彩色反射全息图方面的潜力,它易于制成准全色,所制全息图的衍射效率可与 DCG 制作的全息图的衍射效率相媲美,而所需曝光量却比 DCG 低。

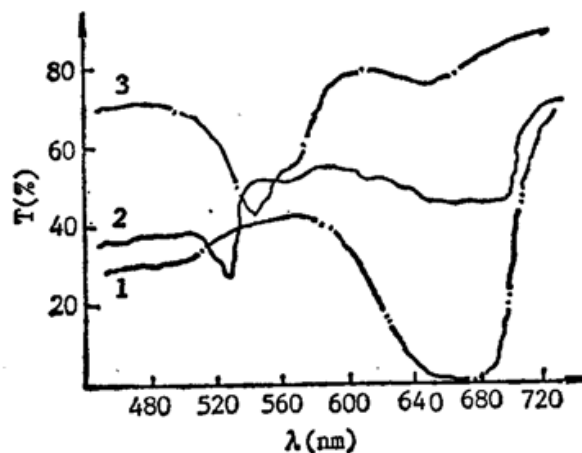


Fig. 4 Percent transmission versus wavelength for the colour reconstructed image

[Fig. 3 Photograph of the colour reconstructed image—see colour picture on inside back cover]

### 四、彩色再现像的色度和色彩控制

1. 彩色再现像的色度计算 彩色再现像由三个灰阶分布不同的红、绿、蓝色再现像相加而成。按 CIE<sup>[6]</sup>色度计算方法,可得彩色再现像的三刺激值为:

$$\begin{aligned} X &= h \sum_{i=1}^3 \sum_{\lambda} \eta_i(\lambda) S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda, \\ Y &= h \sum_{i=1}^3 \sum_{\lambda} \eta_i(\lambda) S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda. \end{aligned} \quad (2)$$

$$Z = k \sum_{i=1}^3 \sum_{\lambda} \eta_i(\lambda) S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda。$$

其中  $i=1, 2, 3$  代表红、绿、蓝三原色,  $\eta_i(\lambda)$  为全息图的衍射效率, 它由数值  $\eta_i$ 、中心波长  $\lambda_{0i}$  和宽度  $(\Delta\lambda)_i$  决定。

对彩色反射全息图, 只有在处理工艺上解决了记录介质的胀、缩问题, 中心波长才能取三原色波长。而宽度  $(\Delta\lambda)_i$  为全息图再现像的波长偏移量, 它的表达式为:

$$(\Delta\lambda)_i = (x_i \lambda_i^2) / (\pi n d \sin \theta_B)。$$
 (3)

其中  $x_i=3.5$ ,  $d$  为明胶厚度,  $\theta_B$  为布喇格角。

2. 彩色再现像的色彩控制 (1) 色串扰。消除彩色反射全息图红、绿、蓝三色再现像的色串扰是得到高色彩保真度的彩色再现像的先决条件。Ar<sup>+</sup>-Kr<sup>+</sup> 激光器输出的绿、蓝光波长差小, 当满足下式时三色像互不串扰。

$$(\Delta\lambda)_2 + (\Delta\lambda)_3 \leq \lambda_2 - \lambda_3$$
 (4)

表 1 给出当  $\theta_B=80^\circ$  时的波长偏移量  $(\Delta\lambda)_i$ 。

Table 1 Wavelength broadening of the reflection hologram

$\lambda_i$ (nm)	$(\Delta\lambda)_i$ (nm)	
	$d=7 \mu\text{m}$	$d=15 \mu\text{m}$
488.0	12.7	5.9
514.5	14.1	6.6
647.1	22.3	10.4

可见, 只要空气中的参考光束、物光束夹角大于  $150^\circ$  (对应  $\theta_B=80^\circ$ ), 即使对于  $7 \mu\text{m}$  厚的记录介质, 也可以消除彩色反射再现像的色串扰。(2) 再现时记录波长的重现。由(2)式知, 只有全息图再现时的中心波长和记录时的波长一致, 才能得到高色彩保真度的彩色再现像。因此, 控制记录材料的处理工艺, 使全息图再现时重现记录波长是获得真彩色再现像的关键环节。对于银盐和 DCG 材料, 已有若干有效的方法<sup>[7]</sup>重现记录波长。对光致聚合物材料, 我们采用调整全息图记录时的曝光量或采用不同的温度处理, 使全息像的波长与记录波长十分接近。(3) 衍射效率  $\eta_i$  及其配比。三色光的衍射效率  $\eta_i$  及其配比直接影响再现像的色彩。本文用准全色的光致聚合物干板对三色光一次曝光制作了单张彩色反射全息图。它的优点是经济、制作省时。它的衍射效率及其配比主要通过两个途径得以控制: (a) 调整三色光各自对干板的曝光量; (b) 调整三色光各自的参考光、物光光强比。实践证明, 本文采用黄、品红、青色减色滤光片的方法对控制再现像的亮度和色彩效果很好。具体拍摄时, 先由三原色光的功率比、记录材料的光谱灵敏度估算减色滤光片的颜色、序号和曝光时间, 然后由全息图再现像的色彩作进一步调整, 直到获得衍射效率高、色彩逼真的再现像。

芦维强同志测试了文中的光谱透射率曲线, 在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] T. Kubota; *Appl. Opt.*, 1986, **25**, No. 22 (Nov), 4141~4145.  
[2] R. T. Ingwill and H. L. Fielding; *SPIE, Applications of Holography*, 1985, **523**, 306~312.  
[3] *holosphere*, 1986, **14**, No. 2, 29.  
[4] 马春荣, 郎恒元; 《北京工业学院学报》, 1988, **8**, No. 2, 75~79。  
[5] 马春荣, 郎恒元; “彩色全息记录介质”, 发明专利申请号: 88101091X。  
[6] 荆其诚等; “色度学”, (科学出版社, 北京, 1979), 91~102。  
[7] 于美文, 张静方; “全息显示技术”, (科学出版社, 北京, 1989), 146~154。

**Colour reflection holograms with photopolymer plates**

ZHANG JINGFANG, MA CHUNRONG AND LANG HENGYUAN  
(Department of Engineering Optics, Beijing Institute of Technology)

(Received 27 January 1989; revised 16 August 1989)

**Abstract**

Reflection gratings are constructed with red(647.1nm), green (514.5nm) and blue (488.0nm) laser beam respectively using quasi-panchromatic photopolymer plates. The curves of percent transmission versus wavelength are given. Using subtractive films, colour reflection holograms are recorded with red, green and blue beam from Ar<sup>+</sup>-Kr<sup>+</sup> laser simultaneously. Chromaticity coordinates and colour fidelity of colour reflection holograms are discussed.

**Key words:** quasi-panchromatic photopolymer plates; reflection grating; colour reflection holograms; chromaticity coordinates; colour fidelity.