

# 素面彩虹全息材料的光栅常数测量方法比较

黄敏\*\*, 习永惠, 李修\*, 郭春丽, 何瑞丽

北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600

**摘要** 为了方便、快捷地进行素面彩虹全息材料的光栅常数测量, 选用颜色测量领域常用的分光光度计(环形光照明)和扫描设备, 在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内, 固定测量点, 旋转彩虹全息材料, 进行不同素面彩虹全息材料的光谱能量信息和图像信息采集。研究发现随着旋转角度的变化, 在  $0^\circ \sim 45^\circ$  和  $45^\circ \sim 90^\circ$  两个范围内采集到素面彩虹全息材料的光谱能量和图像颜色信息呈周期对称变化。由光栅方程的计算得出, 在素面彩虹全息材料其正方形栅格的边长和对角线方向具有两个不同的有效光栅常数。研究结果与高倍数显微设备测量结果具有较好的一致性。测量结果可为检验光柱和素面彩虹全息材料的微观结构提供一种理论计算依据。

**关键词** 颜色; 素面彩虹全息材料; 光栅常数; 光栅方程; 光谱能量

中图分类号 O432

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1033003

## Comparison of Grating Constant Measurement Methods for Plain Rainbow Holographic Materials

Huang Min\*\*, Xi Yonghui, Li Xiu\*, Guo Chunli, He Ruili

*School of Printing and Packaging Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China*

**Abstract** In order to measure the grating constants of the plain rainbow holographic materials quickly and conveniently, the spectrophotometers (loop light illumination) and scanning equipments commonly used in color measurement fields are used to collect the spectral energy and image information of different plain rainbow holographic materials by fixing the measuring point and rotating the plain rainbow holographic materials in the range of  $0^\circ \sim 90^\circ$ . It is found that with the change of rotation angle, the spectral energy and image color information of the plain rainbow holographic materials collected in the range of  $0^\circ \sim 45^\circ$  and  $45^\circ \sim 90^\circ$  show a periodic and symmetrical change. From the grating equation, it is found that there are two effective grating constants in the side length and diagonal directions of the holographic master materials. The experimental results are in good consistency with those obtained by high amplification ratio microscopes. The measured results can provide a theoretical basis for the examination of the microstructures of light pillar holographic materials and plain rainbow holographic materials.

**Key words** color; plain rainbow holographic materials; grating constant; grating equation; spectral energy

**OCIS codes** 330.1710; 330.1720; 330.6180

## 1 引 言

彩虹全息纸因其炫丽的亮彩虹效果, 在包装印刷领域得到了广泛应用。目前市面上较多使用光柱彩虹全息纸和素面彩虹全息纸作为承印基底材料。彩虹全息纸是由全息光栅模压版(以下简称母版)经过转印、加工形成的, 母版的制作是彩虹全息纸生产的核心环节, 其版材主要采用特殊金属薄片经电铸制成, 具有较强的硬度和柔韧性<sup>[1]</sup>。母版的微观结

构(包括光栅常数、光栅结构等)是判别彩虹全息纸是否由同一块母版转印而来的重要依据, 可用于彩虹全息纸张和相关印刷产品的真伪鉴定。而在自然光照下, 人眼无法区分由不同微观结构的母版加工得到的彩虹全息纸的亮彩虹颜色差异。

由于光柱彩虹全息纸的明暗光柱较为明显地影响了人们对纸张及其印刷品的颜色判定, 现有研究主要围绕如何测量光柱彩虹全息纸张的颜色和如何计算色差展开<sup>[2-5]</sup>, 对素面彩虹全息纸的色度测量方

收稿日期: 2019-01-29; 修回日期: 2019-04-02; 录用日期: 2019-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(61675029, 61805018)、北京市教委科技创新提升项目(PXM2017\_014223\_000061)

\* E-mail: lixiu@bigc.edu.cn; \*\* E-mail: huangmin@bigc.edu.cn

法的相关研究和文献介绍较少,在进行素面彩虹全息纸颜色测量时,测试者较多选用积分球式分光光度计。用积分球式分光光度计测量由不同微观结构素面彩虹全息母版加工形成的彩虹全息纸色度值时,漫射光照射下采集到的纸张色度值差异较小<sup>[6]</sup>,属于同色异谱现象。无法鉴别不同素面彩虹全息纸是否由同一微观结构的彩虹全息母版加工得到。目前常选用高倍数显微放大的光学仪器进行彩虹全息材料的光栅微观影像观测,但此类设备属于高精度光学仪器,并不能在包装印刷领域广泛使用。Yang等<sup>[7]</sup>提出用扫描的方式测量彩虹全息材料的微观常数,该方法需要提前预知扫描设备的照明和反射光路的光学参数,同时需要多次旋转被扫描样品,采集其在不同旋转角度下的 RGB 图像。Rogelj等<sup>[8]</sup>用双向反射分布函数(BRDF)描述光学可变设备(OVDs)在不同方向的图像信息,从而计算 OVDs 的光栅条纹周期。该方法的使用需要搭建 BRDF 测量装置,在工业界广泛使用方面仍有较大的局限性。徐艳芳等<sup>[6]</sup>提出一种素面彩虹全息纸颜色特性的表征与检测方法,该方法主要涉及素面彩虹全息纸颜色特性的测量,并未对其微观结构做进一步的比较研究。本课题组<sup>[9]</sup>前期提出了一种用多角度分光光度计测量光柱彩虹全息纸光栅常数的方法,但由于光柱彩虹全息母版的微观结构是一维的,素面彩虹全息母版的光栅结构是二维的,

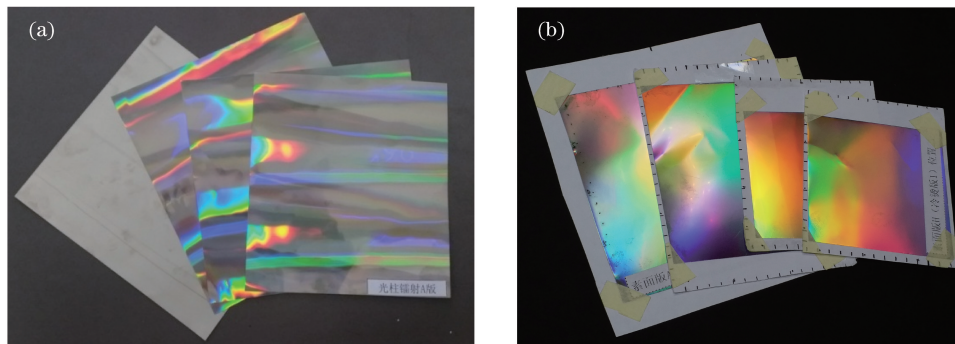


图 1 彩虹全息母版实物图。(a)光柱彩虹全息母版;(b)素面彩虹全息母版

Fig. 1 Pictures of rainbow holographic master masks. (a) Light pillar rainbow holographic master masks; (b) plain rainbow holographic master masks

本次研究进行素面彩虹全息母版的光栅常数测量和微观结构对比,比较不同方法的测量结果和测量精度,用于不同母版的差异比较和真伪鉴定。

### 3 微观显示测量法

选用 4 块具有不同微观结构的素面彩虹全息母版进行测量,分别命名为 A,B,C,D 版。用日本

用来检测两种彩虹全息母版微观结构的方法并不能通用。同时考虑到该方法需要使用多角度分光光度计,该仪器为工业级颜色测量仪器,价位相对较高,普适性不强。

为方便、快捷地进行素面彩虹全息材料的微观结构测量,本次研究选用了光学显微镜、颜色测量领域常用的分光光度计和专业级扫描设备,在素面彩虹全息材料无明显蹭脏和划痕位置处采集光谱能量信息和图像颜色信息。根据采集到的光谱形状、峰值波长位置和图像颜色等信息,结合光栅方程,计算不同素面彩虹全息材料的光栅常数,进而比较其微观结构差异,进一步可实现不同材料的真伪鉴定。

## 2 彩虹全息材料

以母版为原版,经过模压、镀铝、复合、涂布、分切等工艺将母版上刻划的光栅条纹转印到纸张上<sup>[1]</sup>,母版、模压膜、镀铝膜和成品纸张(为方便起见,以上统称为彩虹全息材料)都具有相近光栅结构和光栅周期(光栅常数)的全息单元,光栅条纹是彩虹全息材料最终呈现亮彩虹效果的关键。为更加直观地比较光柱彩虹全息材料和素面彩虹全息材料的实物彩虹效果、微观结构和光谱能量差异等信息,文中将本课题组前期对光柱彩虹全息纸的部分测量结果列出<sup>[10]</sup>,方便进行比较。图 1 为光柱彩虹全息母版和素面彩虹全息母版的实物图。

基恩士公司 VK-X200K 型 3D 激光共聚焦形貌显微镜测量得到素面彩虹全息母版的光栅结构为  $x$ - $y$  方向对称的二维方格状(图 2)。测量得到素面彩虹全息母版 A,B,C,D 的光栅常数(以正方形栅格的边长定义)分别约为  $1.05 \mu\text{m}(\pm 0.02 \mu\text{m})$ ,  $0.88 \mu\text{m}(\pm 0.05 \mu\text{m})$ ,  $0.85 \mu\text{m}(\pm 0.05 \mu\text{m})$  和  $1.01 \mu\text{m}(\pm 0.05 \mu\text{m})$ ,其中括号中数值为 5 次测量结果的标

准偏差。不同母版的微观结构不同,其中 A,B,C 版方格内的全息单元为近方形,D 版方格内的全息单元为凹陷的圆形。在测量时,可通过图 2(a)~(d)下方图中的深度变化曲线测量,得到不同素面全

息母版的光栅周期。通过对微观结构的进一步观察发现,不同的素面彩虹全息母版在每个小全息单元内均有不同程度的凸起或凹陷,如图 2(e)~(h)所示。

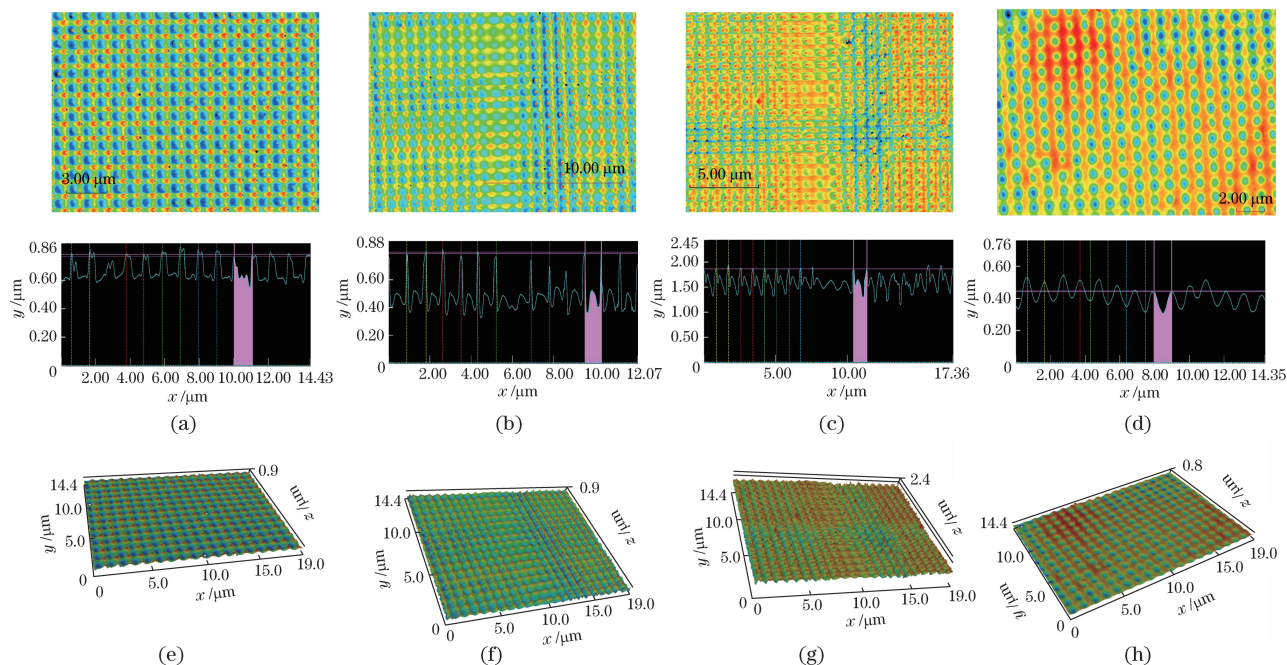


图 2 不同素面彩虹全息材料的微观结构图(放大 24000 倍)。(a)~(d)素面彩虹全息母版 A,B,C,D 微观结构平面图; (e)~(h)素面彩虹全息母版 A,B,C,D 微观结构立体图

Fig. 2 Microstructures of different plain rainbow holographic materials with enlargement of 24000 times. (a)-(d) Planar figures of micro-structures of plain rainbow holographic master masks A, B, C, and D; (e)-(h) solid figures of micro-structures of plain rainbow holographic master masks A, B, C, and D

本课题组前期测量得到图 1(a)所示的光柱彩虹全息母版和纸张在日本基恩士公司 VK-X200K 型 3D 激光共聚焦显微镜下放大 3000 倍的微观结构如图 3 所示<sup>[10]</sup>(其光栅常数约为  $1.0 \mu\text{m}$ )。可见,

光柱彩虹全息纸张的光栅为一维,沿着光柱方向上的光栅条纹偏转方向一致,相邻光柱间的光栅条纹偏转方向呈现周期性变化,与素面彩虹全息母版的微观结构具有较大的不同。

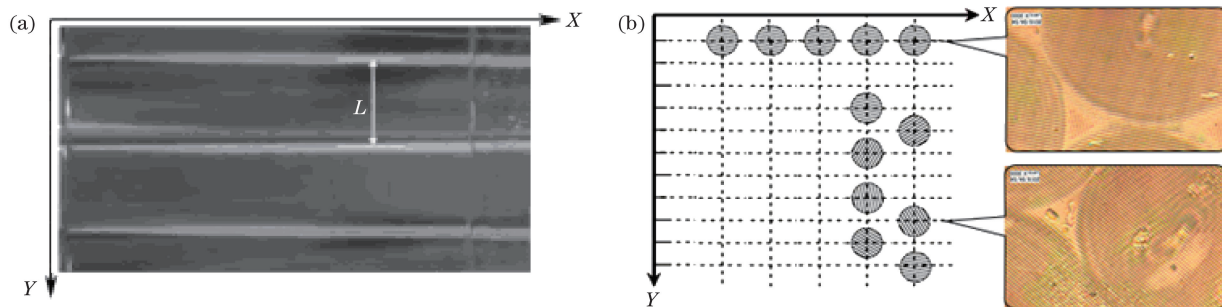


图 3 光柱彩虹全息材料的外观视觉效果和不同位置的微观结构。(a)外观视觉效果;(b)不同位置的微观结构

Fig. 3 Visual appearance and microstructures at different positions of light pillar rainbow holographic material.

(a) Visual appearance; (b) microstructures at different positions

## 4 光谱测量法

### 4.1 光谱能量采集

分光光度计是颜色测量领域常用的仪器,对于

反射物体,国际照明委员会推荐了 4 种标准照明/观察条件,分别为  $d/0, 0/d, 45/0$  和  $0/45$ <sup>[11]</sup>( $d/0$  表示积分球式的测量条件)。选用漫射光照明的测量条件( $d/0$  和  $0/d$ ),当入射光为漫射光时,经过衍射后



的光线没有固定的衍射角,混合光与光源光谱成分相同,可以抵消衍射光栅的分色作用,进而反映出被测样品的色度信息。因此分光光度计在测量高光泽及彩虹全息材料的色度值及进行色差评价时常被采用,但对彩虹全息材料的微观结构测量并不适用。

彩虹全息材料由于光栅的分色作用在不同方向具有不同的干涉、衍射信息,可选用图 4 所示的美国

X-Rite 公司 MA68II 型多角度分光光度计(测量几何条件为  $45^\circ$  照明,  $15^\circ$ 、 $25^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $110^\circ$  5 个角度测量)和 SpectroEye 分光光度计(环形光照明,测量几何条件为  $45/0$ )进行不同方向的光谱信息采集。为了比较图 4(a)所示固定光源角度照明和图 4(b)所示环形光照明对采集到的光谱能量信息的影响,图 4(a)中仅给出  $45^\circ$ (即沿法线)方向采集到的光谱能量信息。

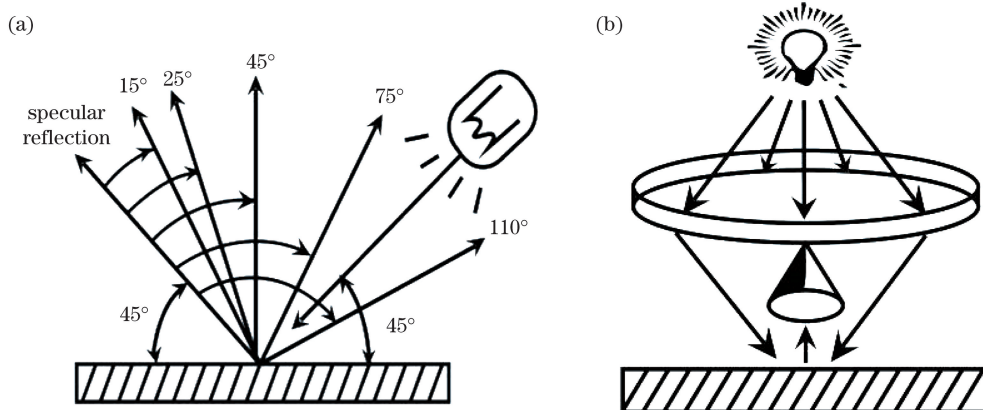


图 4 不同分光光度计的几何测量条件示意图。(a) 多角度分光光度计;(b)  $45/0$  分光光度计

Fig. 4 Diagrams of geometric measurement conditions of different spectrophotometers.

(a) Multi-angle spectrophotometer; (b)  $45/0$  spectrophotometer

考虑到素面彩虹全息母版的二维光栅结构,测量时,固定分光光度计,以彩虹全息母版上的固定测量点为中心,在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内,每间隔  $5^\circ$  依次旋转各素面彩虹全息母版,采集不同素面彩虹全息母版的光谱能量信息。该方法可模拟光源在不同方向的照明,光电探测器在固定方向采集光谱能量信息。图 5、6 为美国 X-Rite 公司 MA68II 型多角度分光光度计和 SpectroEye 分光光度计采集到的不同旋转方向下各素面彩虹全息母版的光谱能量信息。其中,MA68II 和 SpectroEye 的测量光谱范围分别为  $400 \sim 700 \text{ nm}$  和  $380 \sim 730 \text{ nm}$ ,带宽均为  $10 \text{ nm}$ 。图 5 中,图 5(a)~(d) 为素面彩虹全息母版 A, B, C, D 在  $0^\circ \sim 45^\circ$  范围旋转测量得到的光谱能量信息;图 5(e)~(h) 为在  $50^\circ \sim 90^\circ$  范围旋转测量得到的光谱能量信息。图中,  $E(\lambda)$  为光谱能量。

由图 5 可见,采集到的素面彩虹全息母版(具有不同光栅常数)光谱能量信息具有较大差异,而且光谱带宽较宽。这与照明光源的物理尺寸及正方形光栅的多缝衍射相关,光电探测器接收到的是一定波长范围的复合光。随着素面彩虹全息母版旋转角度的变化,采集到的光谱能量信息也呈现周期性变化。

仪器采集到的光谱能量信息主要来自反射和衍射效应,由于光电探测器的接收角度不在光的镜面反射方向,当采集到的光谱能量信息远大于  $100\%$  时,可认为是不同光栅的多缝干涉和衍射能量叠加的结果。比较光栅常数为  $1.01 \sim 1.05 \mu\text{m}$  的 A 版、D 版和光栅常数为  $0.85 \sim 0.88 \mu\text{m}$  的 B 版、C 版,发现: 1) 在  $0^\circ \sim 45^\circ$  范围旋转彩虹全息母版 A 和 D 时,  $0^\circ \sim 5^\circ$  位置处,光谱能量信息的峰值波长为  $700 \text{ nm}$  左右,且峰值能量大于  $100\%$ ;随着旋转角度的增加,光谱能量信息在可见光波段急剧下降,直到将 A 版和 D 版旋转到  $40^\circ \sim 45^\circ$  位置处,采集到的光谱能量信息的峰值波长为  $470 \sim 500 \text{ nm}$ , A 版峰值能量大于  $100\%$ , D 版峰值能量小于  $100\%$ ,如图 5(a)(d) 所示; 2) 在  $0^\circ \sim 45^\circ$  范围内测量 B 版,在  $15^\circ \sim 35^\circ$  位置处,光谱能量信息的峰值波长出现在  $500 \sim 700 \text{ nm}$  波段,在  $45^\circ \sim 90^\circ$  范围内,  $60^\circ \sim 80^\circ$  位置处,光谱能量信息的峰值波长出现在  $400 \sim 470 \text{ nm}$  波段,上述峰值能量均大于  $100\%$ ,如图 5(b)(f) 所示; 3) 在  $0^\circ \sim 45^\circ$  范围内测量 C 版,在  $10^\circ \sim 25^\circ$  位置处,光谱能量信息的峰值波长出现在  $400 \sim 480 \text{ nm}$  波段,在  $45^\circ \sim 90^\circ$  范围内,  $50^\circ \sim 70^\circ$  位置处,光谱能量信息的峰值波长出现在  $500 \sim 700 \text{ nm}$



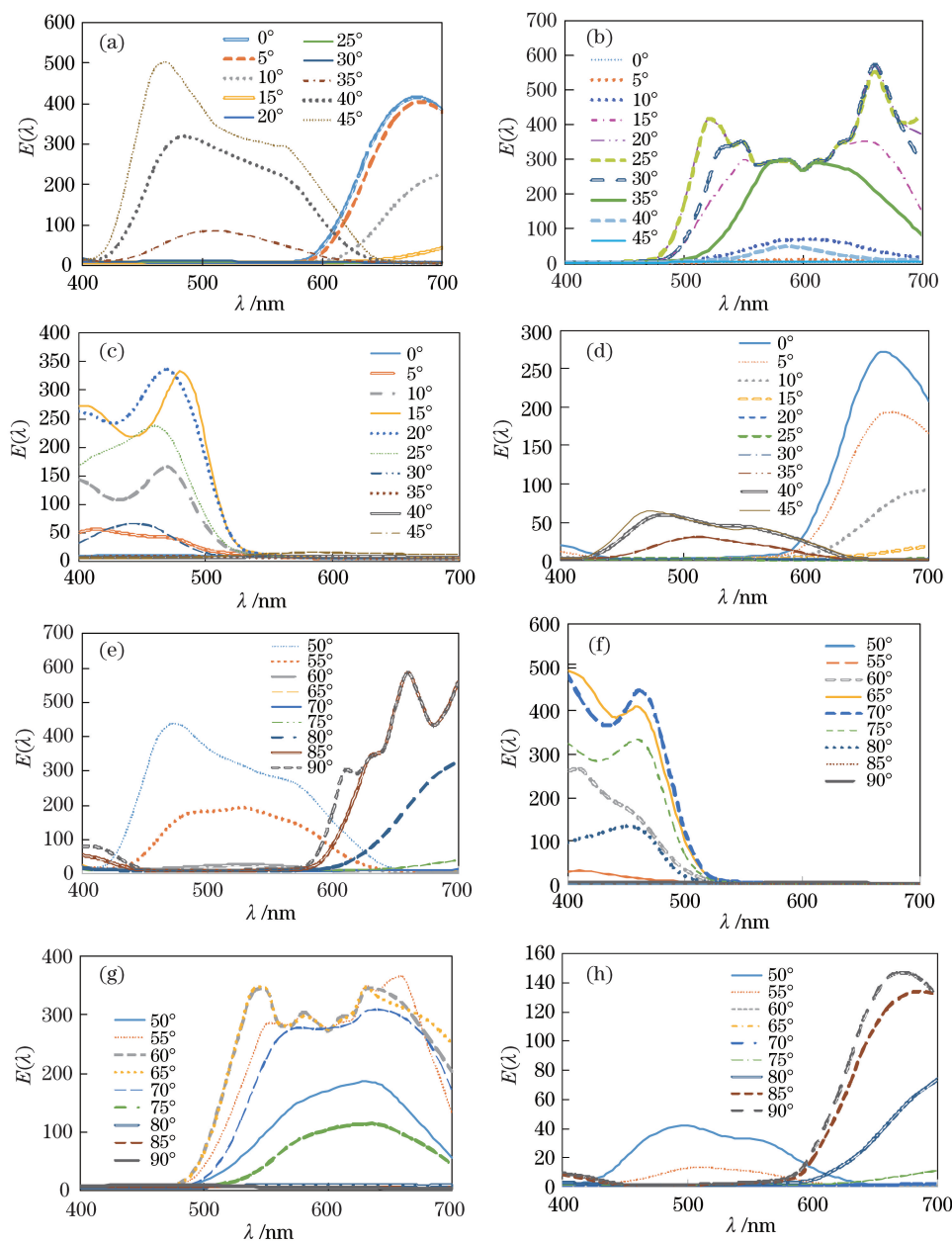


图 5 多角度分光光度计 45/0 的测量结果。(a)~(d)素面彩虹全息母版 A,B,C,D 在 0°~45° 的光谱能量信息；  
(e)~(h)素面彩虹全息母版 A,B,C,D 在 50°~90° 的光谱能量信息

Fig. 5 Measurement results of multi-angle spectrophotometer in condition of 45/0. (a)-(d) Spectral intensity from plain rainbow holographic master masks A, B, C, and D in the directions of 0°-45°; (e)-(h) spectral intensity from plain rainbow holographic master masks A, B, C, and D in the directions of 50°-90°

波段,峰值能量均大于 100%,如图 5(c)(g)所示。同时可见,图 5(b)与图 5(g),图 5(c)与图 5(f)也具有相近的光谱形状,这是因为 B、C 版的光栅常数相同。

图 6 中用美国 X-Rite 公司 SpectroEye 45/0 环形光照明测量时,固定测量点,不同旋转位置处采集到的光谱形状、峰值波长出现的位置较为接近,而且在可见光范围内均有两个峰值。这是因为环形光照明时无论母版如何旋转,在衍射平面内光源的照明

方向和探测器接收方向并不会发生变化。图 6(a)和图 6(d)中,A 版和 D 版的两个峰值波长位置接近,在 700 nm 和 500 nm 左右,不同的是 D 版峰值波长处的能量低于 100%[与图 5(h)具有较好的一致性],这与各全息单元微观结构参数,如刻槽深度、光栅形状等都有一定的关系;图 6(b)和图 6(c)中,B 版和 C 版的两个峰值波长位置接近,在 600 nm 和 420 nm 左右,但光谱形状及峰值能量也具有较为明显的差异。

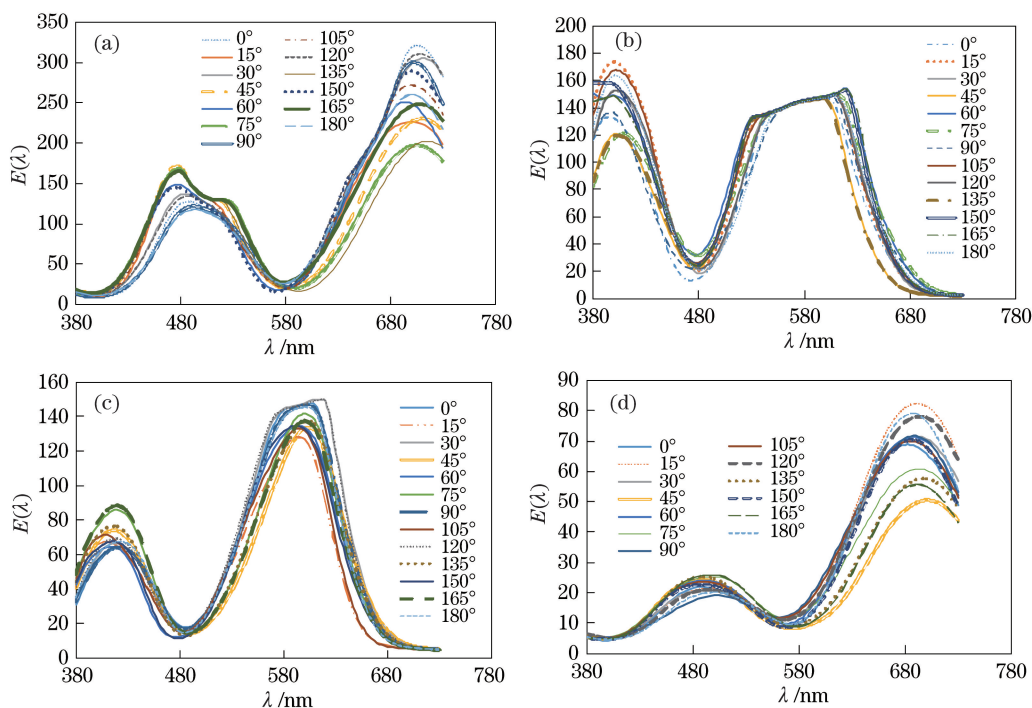


图 6 SpectroEye 测量各素面彩虹全息母版的结果。(a) A 版;(b) B 版;(c) C 版;(d) D 版  
Fig. 6 Results of SpectroEye measurement for each plain rainbow holographic master mask.

(a) Mask A; (b) mask B; (c) mask C; (d) mask D

比较图 5、6 中不同几何测量条件的分光光度计采集到的光谱能量信息,可见图 6 中 SpectroEye 分光光度计(45/0, 环形光照明)的测量重复性较好,不会因为测量的初始位置改变而发生明显的能量变化,在素面彩虹全息材料的任意位置处对素面彩虹全息母版的光谱能量信息进行一次测量采集即可。

#### 4.2 光栅常数计算

彩虹全息材料的各全息单元具有与可见光波长同量级的光栅<sup>[12]</sup>,光栅方程为

$$d(\sin i + \sin j) = k\lambda, \quad (1)$$

式中: $d$  为光栅常数,即光栅条纹周期; $i$  和  $j$  分别为光线的入射角和衍射角; $k$  为衍射级数。

随着光源照明方向的变化,采集到的光谱能量信息发生了较大的变化,这是由不同可见光波长的光衍射引起的。在图 7 所示的衍射平面内,固定入射角和探测角的位置,旋转素面彩虹全息材料,分光光度计采集到的光谱能量会出现两个峰值波长(图 5、6)。图 6 中,环形光照明采集到的光谱能量信息较为稳定,这可由素面彩虹全息母版的二维光栅结构得到解释:环形光照明,入射角为  $45^\circ$ ,光电探测器接收角度为  $0^\circ$ ,A 版和 D 版的光栅常数  $d$  在  $1.01\sim 1.05\ \mu\text{m}$  范围内,将上述参数代入(1)式所示

光栅方程,沿着素面彩虹全息材料各全息单元的小方格边长方向,计算得到一级衍射极大波长在  $714\sim 740\ \text{nm}$  范围;沿着素面彩虹全息材料的各全息单元的小方格对角线方向(即  $x, y$  方向的衍射叠加),光栅常数为  $1.0\times\sqrt{2}\ \mu\text{m}$ ,计算得到的二级衍射极大波长在  $505\sim 525\ \text{nm}$  范围内。同理可知,B 版和 C 版的光栅常数为  $0.85\sim 0.88\ \mu\text{m}$ ,计算得到的一级和二级衍射极大波长分别在  $600\sim 622\ \text{nm}$  和  $425\sim 440\ \text{nm}$  范围内。以下将上述正方形栅格边长方向和对角线方向的光栅常数简称为有效光栅常数。

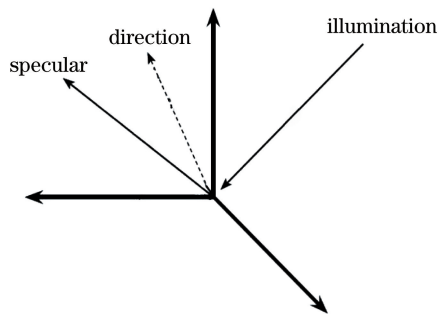


图 7 入射衍射方向示意图<sup>[8]</sup>

Fig. 7 Diagram of diffraction direction of incident light<sup>[8]</sup>

图 5 中用美国 X-Rite 公司 MA68II 型多角度分光光度计测量得到的光谱曲线发生周期性且较为明显变化的原因在于:光源在固定角度照明,由于光

源具有一定的物理尺寸,随着素面彩虹全息母版角度的旋转,在衍射平面内,入射角为  $45^\circ$ ,光电探测器接收角度为  $0^\circ$ ,有效光栅常数发生变化。由于光栅衍射作用,在某些旋转方向,几乎没有可见光范围的光能量进入探测器<sup>[10]</sup>,因此测量得到的光谱能量很低。同理也可解释图 8 中 SpectroEye 测量得到的光柱彩虹全息母版光谱能量信息分布,由于光柱彩虹全息材料由一维光栅(其光栅常数为  $1.0 \mu\text{m}$ )构成,在固定测量点、不同旋转位置处,由光栅方程可知,采集到的光谱能量只有一个峰值能量,即为  $707 \text{ nm}$  左右一级衍射极大波长。

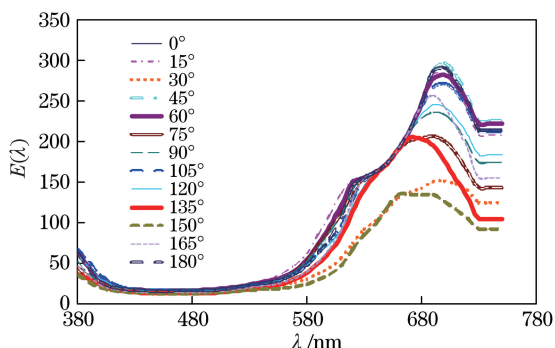


图 8 SpectroEye 测量光柱彩虹全息母版的结果

Fig. 8 Results of the SpectroEye measurement for the light pillar rainbow holographic master masks

将图 6 中不同旋转角度处测量得到光谱曲线的峰值波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  代入光栅方程(1)式,可计算出不同峰值波长处对应的光栅常数  $d_1$  和  $d_2$ ,如表 1 所示。

表 1 不同峰值波长处对应的光栅常数

Table 1 Grating constants corresponding to different peak wavelengths  $\mu\text{m}$

Plain rainbow master mask	$\lambda_1$	$d_1$	$\lambda_2$	$d_2$
A	0.69-0.71	$0.99 \pm 0.01$	0.48-0.49	$0.97 \pm 0.01$
B	0.60-0.62	$0.87 \pm 0.02$	0.38-0.40	$0.78 \pm 0.01$
C	0.59-0.60	$0.84 \pm 0.01$	0.41-0.42	$0.83 \pm 0.01$
D	0.68-0.70	$0.98 \pm 0.01$	0.49-0.50	$0.99 \pm 0.01$

表 1 中  $d_1$  由  $\lambda_1$ 、 $d_2$  由  $\lambda_2$  分别代入光栅方程计算得到。将计算结果汇总,可见由光谱测量法计算得到 A,B,C,D 4 块素面彩虹全息材料的光栅常数,测量误差最大的为 B 版,变化范围为  $0.78 \sim 0.87 \mu\text{m}$ ,其余 3 块彩虹全息材料的变化范围都较小。分析原因主要是图 6 中测量得到 B 版在  $\lambda_1$  处的峰值波长分布范围较宽。

## 5 扫描测量法

本次测量选用了日本 Epson 公司 12000XL 型专业扫描仪,扫描分辨率设定为 600 dpi(dpi 为图像每英寸长度内的像素点数),图像类型选择 24 位全彩图。扫描仪的照明光源为白光 LED 点光源,色温为 6639 K。图 9 为归一化的扫描仪光源相对光谱功率分布曲线,图 10 为扫描光路示意图。可见,对于(1)式所示光栅方程,入射角  $i$  在  $24^\circ \sim 29^\circ$  间(受光源物理尺寸的影响)变化,反射光/衍射光沿着法线方向,光电探测器的接收角度为  $0^\circ$ 。

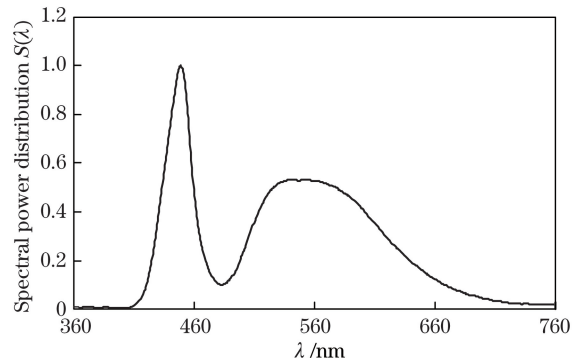


图 9 扫描仪光源的光谱功率分布

Fig. 9 Spectral power distribution of scanner's light source

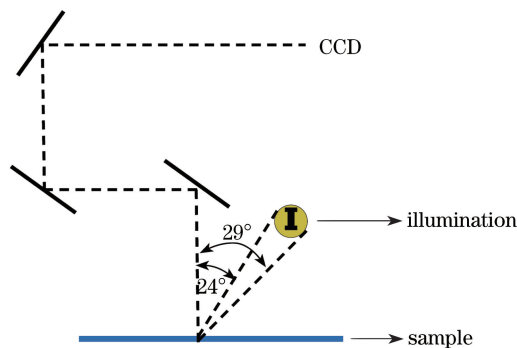


图 10 扫描仪扫描光路示意图

Fig. 10 Schematic of scanning optical path of scanner

将 A,B,C,D 4 块不同的素面彩虹全息母版依次放置在扫描仪的扫描平台上进行扫描,在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内,每间隔  $5^\circ$ ,沿顺时针方向旋转母版,扫描得到的 RGB 图像如图 11 所示。

可见,各素面彩虹全息母版上同一位置处的 RGB 颜色信息,随着母版在扫描平台上旋转角度的变化,在  $[0^\circ, 45^\circ]$  和  $[45^\circ, 90^\circ]$  两个范围内呈对称性变化。将母版旋转到  $0^\circ \sim 5^\circ$  位置处,扫描出的颜色均为蓝色;随着母版旋转角度的增加,不同的母版开始呈现出不同的彩虹色效果;旋转到  $45^\circ$  位置处时,图 11(a)和图 11(d)中的 A 版和 D 版出现红色



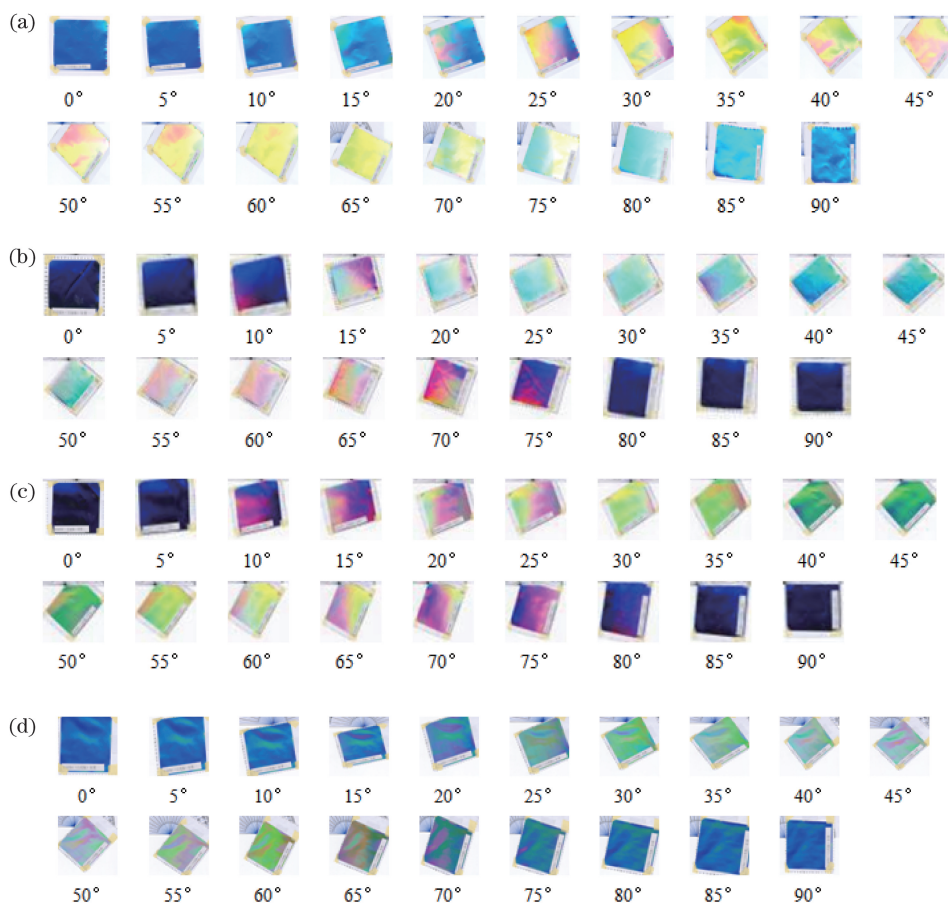


图 11 不同素面彩虹全息母版的颜色随旋转角度的变化。(a) A 版;(b) B 版;(c) C 版;(d) D 版

Fig. 11 Colors of different plain rainbow holographic master masks versus rotation angle.

(a) Mask A; (b) mask B; (c) mask C; (d) mask D

和黄绿色的颜色混合效果,图 11(b)和图 11(c)的 B 版和 C 版出现蓝绿色;当旋转到 50°~80°位置处时,不同的素面彩虹全息母版又呈现不同的彩虹色效果;直到旋转到 85°~90°位置处,B 版和 C 版

出现了蓝色。将图 11 中 4 块素面彩虹全息母版的扫描颜色信息随旋转角度的变化进行汇总,如表 2 所示,其中列出的光栅常数为微观显示测量法中的测量结果。

表 2 不同素面彩虹全息母版的扫描颜色信息

Table 2 Scanning color informations of different plain rainbow holographic master masks

Plain rainbow master mask	$d / \mu\text{m}$	Color				
		0°-5°	5°-40°	40°-45°	50°-80°	85°-90°
A (D)	1.01-1.05	Blue	Rainbow	Red+Green	Rainbow	Blue
B (C)	0.84-0.85	Blue	Rainbow	Blue+Green	Rainbow	Blue

结合(1)式所示光栅方程和图 10 中扫描仪的内部光路图,对图 11 和表 2 所示的扫描图像颜色信息周期性变化结果进行分析,同时考虑到素面彩虹全息母版沿正方形栅格的边长和对角线方向的两个有效光栅常数,A 版和 D 版(B 版和 C 版)在 0°~5°(85°~90°)旋转角度处的光栅常数约为 1.00  $\mu\text{m}$  (0.85  $\mu\text{m}$ ),在 40°~45°旋转角度处的有效光栅常数

为  $1.0 \times \sqrt{2} \mu\text{m}$  ( $0.85 \times \sqrt{2} \mu\text{m}$ )。计算得到各素面彩虹全息母版在不同旋转位置处的一级、二级衍射的主波长,如表 3 所示。

表 3 的计算结果与扫描得到的 RGB 图像颜色信息较为一致。图 11 中的 B、C 版在 0°~5°和 85°~90°位置处扫描得到的蓝色明度低于 A、D 版,这是由于计算得到的衍射光在 345.7~380 nm

为不可见光,进入眼睛的光线数量减少,从而降低了扫描图像的明度。B、C版的光栅常数  $d \leq (0.38/\sin 24^\circ) \mu\text{m} = 0.93 \mu\text{m}$ 。该方法的测量精度主要受限于人眼对不同波段色光对应的颜色感觉,如表4所示。

表3 不同素面彩虹全息母版的衍射极大波长计算结果

Table 3 Results of diffraction maximum wavelength of different plain rainbow holographic master masks

Plain rainbow master mask	$d / \mu\text{m}$	Diffraction maximum wavelength / nm	
		$0^\circ\text{-}5^\circ$ ( $85^\circ\text{-}90^\circ$ )	$40^\circ\text{-}45^\circ$
A	1.00	406.7-484.8	575.2-685.6
B	0.85	345.7-412.1	488.8-583.1
C	0.85	345.7-412.1	488.8-583.1
D	1.00	406.7-484.8	575.2-685.6

表5 由  $0^\circ$ 和  $45^\circ$ 位置处颜色信息计算得到素面彩虹全息材料光栅常数

Table 5 Calculated grating constants of plain rainbow holographic materials in directions of  $0^\circ$  and  $45^\circ$

Plain rainbow master mask	$i / (^\circ)$	Grating constant / $\mu\text{m}$			$d$ (range) / $\mu\text{m}$	$d / \mu\text{m}$
		$0^\circ$ (position)	$45^\circ$ (position)			
		Blue (380-470 nm)	Yellow-Green+ Yellow (530-590 nm)	Blue-Green+ Green (470-530 nm)		
A, D	24	0.93-1.16	0.92-1.03	—	0.93-1.03	0.98 $\pm$ 0.05
	29	0.78-0.97	0.77-0.86	—		
B, C	24	NaN	—	0.82-0.92	0.82-0.92	0.87 $\pm$ 0.05
	29	0.78-0.97	—	0.69-0.77		

比较本次研究选用的3种检测素面彩虹全息母版微观常数的方法:微观显示测量法、光谱测量法和扫描测量法,测量和计算结果均表明素面彩虹全息材料在正方形栅格全息单元的方格边长方向和对角线方向有两个有效光栅常数,且测量得到的光谱信息和颜色信息在 $[0^\circ, 45^\circ]$ 和 $[45^\circ, 90^\circ]$ 两个范围内呈周期性对称变化。利用环形光照明的分光光度计,在任意位置处对素面彩虹全息母版的光谱能量进行一次测量,读取峰值波长位置,并计算光栅常数,该方法也可进一步检验出不同彩虹全息材料的微观结构差异。由于扫描测量法需预知扫描设备的光路参数,使用受到了一定的限制。同时比较表1和表5的测量结果,可知光谱测量法的精度高于扫描测量法,微观显示测量法的测量结果略大于光谱测量法和扫描测量法计算得到的结果。

在后续的研究和应用中,可搭建类似于扫描仪内部光路的测量装置,选用色温为5000~6500 K的白光点光源,预先设定光源入射角  $\alpha$ ,光电探测器接

表4 不同波段色光对应的颜色感觉

Table 4 Color senses corresponding to different wavebands

Waveband / nm	Color sense
380-470	Blue
470-500	Cyan
500-530	Green
530-560	Yellow-Green
560-590	Yellow
590-620	Orange
620-700	Red

将扫描得到的图像颜色,参照表4所示的颜色感觉,代入光栅方程[(1)式]可计算得到4块素面彩虹全息材料的光栅常数  $d$ ,如表5所示。

收方向可定为  $0^\circ$ (即在法线方向接收光信号),固定素面彩虹全息材料,经光源照射后利用 CCD 探测器和光电成像镜头采集素面彩虹全息材料上的图像。结合光栅方程,对采集到的 RGB 图像进行分析。图12为照明光源入射角在  $25^\circ\sim 30^\circ$ 范围、光电探测器的接收角度为  $0^\circ$ 时,通过计算得到的素面彩虹全息材料不同旋转位置( $0^\circ$ 和  $45^\circ$ )处的颜色变化。

图12中,斜线角度代表了光栅方程中的光源入射角度,在已知光源入射角度的情况下,可用两次( $0^\circ$ 和  $45^\circ$ 位置)采集到的图像颜色,如图12中的“1”和“3”、“2”和“4”表征光栅常数为  $0.85 \mu\text{m}$ 、 $1.0 \mu\text{m}$ 左右的素面彩虹全息材料的颜色信息对应的光谱范围。通过其与纵轴交点,可判断素面彩虹全息材料的光栅常数。同时,需要注意的是,“1”和“3”、“2”和“4”与纵轴交点处,光栅常数应为  $\sqrt{2}$ 的倍数关系。图12中的计算结果与图11中日本 Epson 公司12000XL型扫描仪(光源入射角为  $24^\circ\sim 29^\circ$ )扫描得

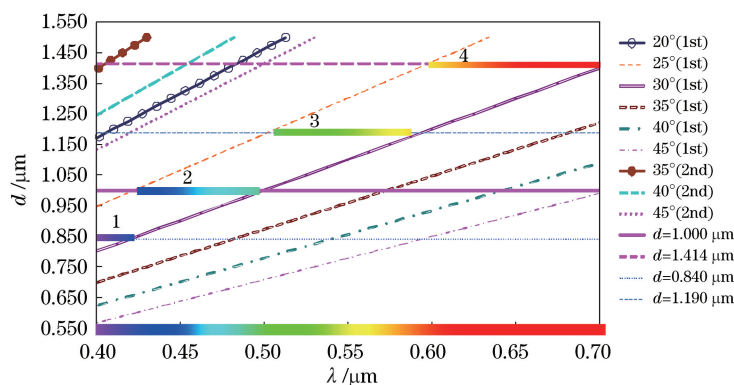


图 12 素面彩虹全息材料光栅常数与入射角的对应关系

Fig. 12 Relationship between grating constant and incident angle for plain rainbow holographic materials

到的 RGB 图像具有较好的一致性。设定素面彩虹全息材料的初始位置为  $0^\circ$ ，采集到 RGB 图像 1；将素面彩虹全息材料旋转  $45^\circ$ ，采集到 RGB 图像 2。

结合两种角度下的 RGB 图像信息并根据光栅方程即可推算出光栅常数，如表 6 所示（其中下划线表示可见光范围以外的颜色）。

表 6 素面彩虹全息母版在不同波长下的光栅常数

Table 6 Grating constants of plain rainbow holographic master masks at different wavelengths

Position	$i / (^\circ)$	$d$					
		$0.85 \mu\text{m}$	$0.95 \mu\text{m}$	$1.0 \mu\text{m}$	$1.1 \mu\text{m}$	$1.2 \mu\text{m}$	$1.3 \mu\text{m}$
$0^\circ$	25	<u>0.359</u>	0.402	0.423	0.465	0.507	0.549
	30	0.425	0.475	0.500	0.550	0.600	0.650
$45^\circ$	25	0.508	0.568	0.598	0.657	0.717	0.778
	30	0.601	0.672	0.707	0.778	0.424	0.460

表 6 中，随着旋转角度由  $0^\circ$  向  $45^\circ$  变化，扫描到的图像颜色由短波段（紫色，蓝色）向中波段（绿色，黄绿色）、长波段（橙色、红色）变化，代入光栅方程 [(1) 式] 计算时， $0^\circ$  和  $45^\circ$  位置处， $k$  均取 1，表明是一级衍射。反之，扫描到的图像颜色由中波段（绿色，黄绿色）、长波段（橙色、红色）向短波段（紫色，蓝色）变化，这时， $0^\circ$  计算时， $k$  取 1； $45^\circ$  计算时， $k$  取 2。其中： $(k_2 \lambda_{45}) / (k_1 \lambda_0) = \sqrt{2}$ ，当  $\lambda_{45} > \lambda_0$  时， $k_1 = k_2$ ；当  $\lambda_{45} < \lambda_0$  时， $2k_1 = k_2$ 。代入光栅方程 [(1) 式] 即可计算出光栅常数。

## 6 结 论

为了方便、准确地进行素面彩虹全息材料的微观结构（光栅常数）测量，选用了 4 块具有不同微观结构的素面彩虹全息母版，用常用的颜色测量仪器（分光光度计和扫描设备），固定测量点，旋转彩虹全息母版，在不同旋转位置处进行了素面彩虹全息材料和光柱彩虹全息材料的光谱能量信息和颜色信息采集。在  $[0^\circ, 45^\circ]$  和  $[45^\circ, 90^\circ]$  两个范围内，采集到的光谱能量信息和颜色信息呈周期、对称变化。测

量结果表明，在素面彩虹全息母版正方形栅格的边长和对角线方向有两个有效光栅常数。微观显示测量法、光谱测量法和高精度扫描测量法得到的光栅常数具有较好的一致性。

综合考虑测量成本和测量便捷性，推荐选用环形照明的分光光度计，对任意位置处素面彩虹全息母版的光谱能量信息进行一次测量，读取峰值波长位置，并计算光栅常数。该方法也可进一步比较不同光谱形状和峰值波长位置，检验不同彩虹全息材料的微观结构差异。在后续研究中，还可搭建颜色信息检测装置，通过采集间隔  $0^\circ$ （光源沿着栅格边长方向照明）和  $45^\circ$ （光源沿着栅格对角线方向照明）两个角度下的素面彩虹全息母版颜色进行光栅常数的计算。

## 参 考 文 献

[1] Ma H G. The research and application of super laser paper [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.  
马宏刚. 幻彩辐射纸的研究与应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.



- [2] Huang X G, Wan X X, Liu Z. Optimization of the method for color measurement of printing on holographic paper [J]. *Color Research & Application*, 2013, 38(2): 130-138.
- [3] Wan X X, Huang X G, Liu Z. Color measurement for holographic photo paper (2010 Asian symposium: next-generation printing science and technology) [J]. *Japanese Society of Printing Science and Technology*, 2011, 48(1): 21-26.
- [4] Feng Z X, Zhang C E, Wang Y S. A new method of color measurement for laser rainbow holographic printed matter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0933001.  
冯之幸, 章春娥, 王岩松. 一种激光彩虹全息印刷品的颜色测量方法 [J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0933001.
- [5] Huang M, Li Z Y, Shi B J, *et al.* Color quality evaluation methods for holographic paper and its printings with light pillars [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0233001.  
黄敏, 李泽阳, 石冰洁, 等. 光柱镭射纸及其印刷品的颜色质量评价方法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0233001.
- [6] Xu Y F, Li S, Pan M Q, *et al.* A method for color characterization and detection of holographic master paper: 103712919 [P]. 2014-04-09.  
徐艳芳, 李斯, 潘民强, 等. 一种素面镭射纸颜色特性的表征与检测方法: 103712919 [P]. 2014-04-09.
- [7] Yang L, Karlsson M. Effective method for fast and detailed analysis of holographic patterns over a large area [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(26): 7491-7497.
- [8] Rogelj N, Penttinen N, Gunde M K. Evaluation of complex gonioapparent samples using a bidirectional spectrometer [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22004-22011.
- [9] Huang M, Wang L F, Liu Y, *et al.* A method for measuring the parameters of light pillar holographic paper with spectrophotometer: 104330240 [P]. 2015-02-04.  
黄敏, 王灵芳, 刘瑜, 等. 一种用分光光度计测量光柱镭射纸光栅参数的方法: 104330240 [P]. 2015-02-04.
- [10] Huang M, Wang L F, Liu Y, *et al.* Measurement and analysis of the spectral and chromaticity values of pillars of light pattern holographic paper [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0633002.  
黄敏, 王灵芳, 刘瑜, 等. 光柱镭射纸的光谱和色度测量分析 [J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0633002.
- [11] Hunt R W G. *Measuring colour* [M]. 4rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
- [12] Zhou H X, Cheng Y F. *Holographic optics: design, manufacture and application* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 5.  
周海宪, 程云芳. *全息光学: 设计、制造和应用* [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 5.