

# 彩色等效灰度掩模制作方法研究\*

罗宁宁 高益庆 谌廷政 漆新民 朱小进 陈劲松

(南昌航空工业学院测控系,南昌 330034)

**摘要** 提出了一种利用彩色等效灰度理论设计掩模的新方法——数据库法。通过选取不同 RGB 值组合成特定颜色,由彩色胶片输出仪输出这些颜色组成的彩色掩模,获得的彩色胶片掩模用来线性调制曝光量,从而实现二元光学元件台阶深度的线性化。给出了理论计算和 16 阶菲涅耳透镜的实验结果,证明了数据库方法设计掩模的可行性。该方法的提出为灰度扩展提供了新途径。

**关键词** 衍射光学;彩色等效灰度理论;彩色掩模;彩色胶片输出仪

**中图分类号** TN305.7 **文献标识码** A

## 0 引言

衍射光学元件已广泛应用于声光、集成光学、光谱学、光互联和量子电子学等领域<sup>[1~4]</sup>。近年来,研究人员探索一些成本低、短周期的衍射光学元件制作方法,其中研究最多的就是灰度掩模法。灰度掩模方法是在掩模平面不同灰度处提供可变的透射率,在经过一次光刻过程和刻蚀后得到所需的衍射光学元件(DOE)。该方法具有成本低、周期短、方法简单、无对准误差等优点,因此成为当前研究最多、最有前途的一种二元光学器件制作方法。

彩色掩模的设计和制作,国内外文献报道较少。用高分辨率的彩色打印机(300-dpi)在透明片上制作彩色掩模的方法国外已有报道<sup>[5,6]</sup>,它为灰度掩模的制作提供了一种新的途径。然而,该方法制作的二元光学元件台阶深度不是按线性规律变化的,而且掩模板分辨率较低。本文提出了一种彩色等效灰度掩模的制作新方法,该方法利用适当选取 R、G、B 值来组成一系列特定颜色,这些颜色构成的彩色掩模由胶片输出仪输出,获得的彩色胶片掩模用来调制曝光量,从而实现二元光学元件的台阶线性变化。

## 1 彩色等效灰度理论

用于制作光学掩模的感光材料,大部分具有很强的感光非线性。以国产 BP213 型正性光刻胶制作 16 台阶闪耀光栅为例,如图 1。由于曝光曲线的非线性,在低台阶对应的光强调制区域 20~50 mJ/cm<sup>2</sup> 内,有效灰度级数远低于高台阶对应的光强调制区域 60~75 mJ/cm<sup>2</sup> 内的有效数量,约有一半的

台阶对应的调制光强落在 60~75 mJ/cm<sup>2</sup> 范围内。当台阶数较少时,可采用 20~50 mJ/cm<sup>2</sup> 内的线性段曝光,所需的光强调制分辨率可能低于 256 级灰阶实际调制分辨率。当进一步提高台阶数,如 16 阶、32 台阶、64 台阶甚至连续时,灰阶调制分辨率将无法满足不同台阶精细深度加工的要求。此时,就要寻求方法使灰度扩展。

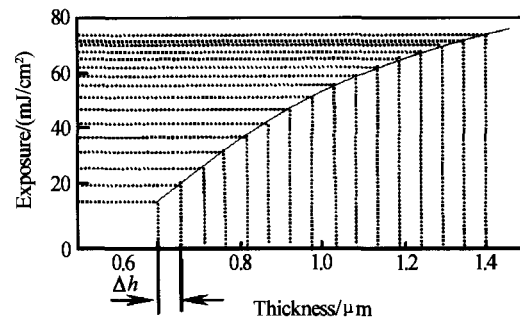


图 1 膜厚-曝光量曲线  
Fig. 1 Thickness-exposure curve

颜色混合基本定律表明:自然界中任何一种颜色均可用 RGB 三原色光混合匹配产生。这个等效色与实际色作用于人眼所引起的彩色视觉是相同的,其配色方程可表示为<sup>[7,8]</sup>

$$[F]=R(R)+G(G)+B(B)$$

R、G、B 是任意彩色[F]的三系数。适当选取不同 RGB 值组合成一系列特定颜色,每种颜色等效于一个灰度级。如果用一种颜色等效为一个灰度,由于彩色范围很宽,就容易实现对灰度等级的精确控制。所谓彩色等效灰度,是指光经某种彩色掩模调制后的效果与经某个灰度掩模调制后的效果相同,这样就可以用彩色掩模来代替原来的灰度掩模。利用彩色等效灰度的方法其实就是寻找与某种灰度掩模透过率相同的 RGB 值的组合。灰度掩模只能是 0-255 级,在相同透过率范围内,彩色掩模通过 RGB 三基色的组合使得灰度级大大扩展了。试验中,彩色掩模用胶片输出仪输出,由于彩色胶片输出仪具有丰

\*航空科学基金(04I56010)和江西省自然科学基金(0412027)资助项目  
Tel:0791-8204525 Email:ningningluo2002@126.com  
收稿日期:2004-10-08

富的颜色范围(24 位真彩色对应 1680 万色全彩输出),这就大大增加了可等效的灰度级. 通过大量实验可知,颜色与灰度之间并不是一一对应的关系,即不同 RGB 值组合成的颜色可能得到相同的透过率,因此等效为同一灰度.

寻找与某一灰度等效的颜色,可采用以下两种方法:

### 1.1 建模法

建立一理论模型,该模型能给出任意颜色与透过率之间的关系. 由于任何一种颜色都能用 RGB 三原色光混合匹配,因此不同颜色掩模对光的透过率是三种基色掩模对光的透过率按一定规律的组合. 整个彩色胶片掩模制作过程涉及较多影响因素:选用胶片类型、曝光的环境温度( $T$ )、色彩的饱和及偏色( $\gamma$ )、胶片输出仪中 CRT 的扫描方式、胶片冲洗参数的影响( $\xi$ )、胶片对特定波长激光的非线性吸收( $\sigma$ )、胶片各色层对激光吸收的层间效应的影响、三基色对特定激光的吸收的复杂机理. 全面考虑整个建模过程中的影响因素,提出如下理论模型

$$\Psi(R, G, B, T, \gamma, \xi, \sigma) = a_1 f(R, T, \gamma, \xi, \sigma) + a_2 f(G, T, \gamma, \xi, \sigma) + a_3 f(B, T, \gamma, \xi, \sigma) + a_4 f(R, G, T, \gamma, \xi, \sigma) + a_5 f(R, B, T, \gamma, \xi, \sigma) + a_6 f(G, B, T, \gamma, \xi, \sigma) + a_7 f(R, G, B, T, \gamma, \xi, \sigma)$$

其中,  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$  是方程待求系数,能够根据试验数据求出. 由于涉及因素太多,求解该模型十分复杂.

### 1.2 数据库法

对一些混合色块进行了测试,发现只要合理选择一些混合色,能够得到线性度很好的曲线,直接在混合色中找出符合条件的颜色组合. 数据库法

要以大量的实验数据为基础,需要测量一定数量颜色的透过率. 为了方便地使用测量数据,建立一个数据库,用时只需查找便可. 此方法比较简单,容易实现. 以下详细介绍了用数据库法来设计彩色掩模.

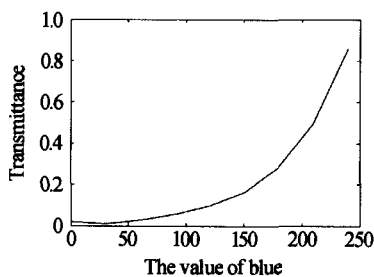
## 2 彩色等效灰度掩模设计

以制作一个 16 台阶的位相调制型元件为例,需要选取由 16 种颜色组成的彩色掩模来调制每个台阶的曝光量. 为了选出 16 种彩色,取一系列特定的 RGB 值,使得颜色规律性变化,用彩色胶片输出仪输出这些颜色对应的色块,利用准直光源,通过激光功率计测得各种颜色的透过率. 实验中,利用彩色胶片输出仪输出了 10 组色块. 为使测试颜色的选取具有代表性,同时尽可能扩大颜色的选取范围,采用每次固定两种颜色,有规律地改变第三组颜色,得到一系列 RGB 组合值. 前九组是彩色的,每一组都包含 9 个小色块,所以一共有 81 种颜色. 从这 81 种颜色中选出 16 种组成彩色掩模来调制曝光量,以形成 16 台阶是完全可能实现的. 对于每一组色块而言,  $R$  和  $G$  的取值固定,  $B$  从 0 到 240 变化,灰阶每次递增 30. 最后一组是黑白的,灰度值从 0 到 230 变化,灰阶每次递增 10. 它们的 RGB 值见表 1. 对测得的各个小色块的透过率进行曲线拟合,各组彩色色块对应的透过率曲线如图 2,最后一组色块的透过率曲线如图 3.

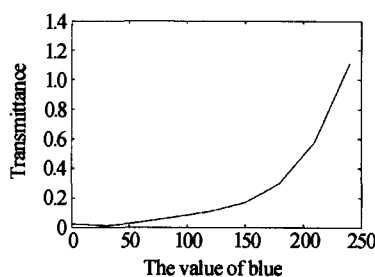
从图 3 可以看出,灰度胶片掩模的光强透过率在白色时最大,黑色时最小. 灰度胶片特性曲线在灰度值为 200~255 之间斜率上升很快. 在选取对应台阶曝光分辨率对应的灰度值时,由于较小灰度值差异将引起较大的曝光光强变化,因此,较低的灰

表 1 十组色块的三基色值

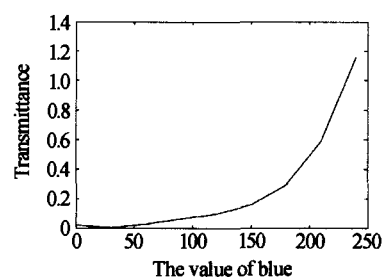
序号	R	G	B	$\Delta B$	序号	R	G	B	$\Delta B$
1	0	255	0-240	30	6	150	255	0-240	30
2	30	255	0-240	30	7	180	255	0-240	30
3	60	255	0-240	30	8	210	255	0-240	30
4	90	255	0-240	30	9	240	255	0-240	30
5	120	255	0-240	30	10	0-230	0-230	0-230	$\Delta R = \Delta G = \Delta B = 10$



(a) Transmittance curve of  $R=0, G=255, B=0-240$



(b) Transmittance curve of  $R=30, G=255, B=0-240$



(c) Transmittance curve of  $R=60, G=255, B=0-240$

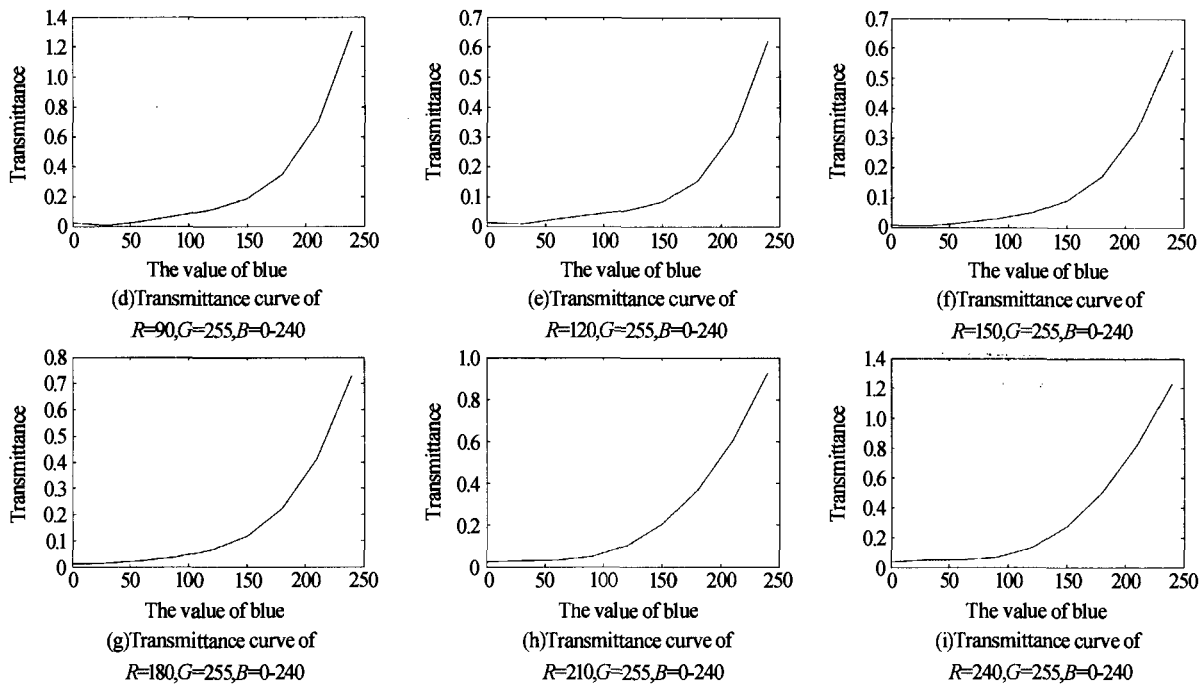


图 2 各组彩色色块对应的透过率曲线  
Fig. 2 Transmittance curves of each group of colors

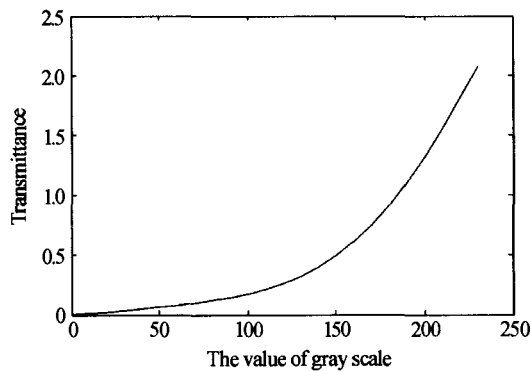


图 3 黑白胶片透过率曲线  
Fig. 3 The transmittance of black-and-white film

阶分辨率会引起较大的曝光误差. 这也是用彩色掩模代替灰度掩模的一个主要原因.

从彩色色块透过率曲线可以看出, 彩色胶片掩模与灰度胶片掩模一样, 其光强透过率随着 B 值的增大而增大. 而且不同 RGB 值组合成的颜色可能得到相同的透过率.

激光在光刻胶中传输时, 波长为  $\lambda/(n-1)$  (其中,  $\lambda$  为此激光在空气中的传输波长,  $n$  为光刻胶的折射率), 要做出的器件是相位调制型, 即一个波长对应的相位为  $2\pi$ . 传统的二元位相元件的每一个周期单元是由  $N=2^n$  个台阶构成的, 其位相差深度均等高且为  $2\pi/N$ . 假设台阶的总的高度为  $\lambda/(n-1)$ , 则每个台阶对应的高度为  $\lambda/[N \times (n-1)]$ , 根据光刻胶膜厚-曝光量曲线可计算出每台阶所需的曝光量, 通过曝光量就能在所测的色块透过率曲线上找出与之对应的颜色.

实验中采用波长为 441.6nm 的氦镉激光器, 激光器的输出功率为 70 mW, 对 BP213 型光刻胶进行曝光. 每个台阶对应的高度为  $\lambda/16(n-1) = 0.4416/16/(1.45-1) = 0.06133 \mu\text{m}$ , 结合光刻胶的厚度-曝光曲线, 通过计算得到每个台阶所需的曝光量. 根据曝光量可以在实测的透过率曲线上找出与曝光量对应的颜色, 它用 RGB 值表示, 结果见表 2.

表 2 每台阶对应的曝光量及彩色

台阶序号	1	2	3	4	5	6	7	8
曝光量(mJ/cm <sup>2</sup> )	19.3138	26.1354	32.6205	38.7184	44.3885	49.6011	54.3368	58.5867
R	0	30	60	90	120	150	180	210
G	255	255	255	255	255	255	255	255
B	131	146	161	161	203	205	198	177
台阶序号	9	10	11	12	13	14	15	16
曝光量(mJ/cm <sup>2</sup> )	62.3523	65.6456	68.4892	70.9161	72.9697	74.7040	76.1834	77.4829
R	240	0	30	60	90	120	150	180
G	255	255	255	255	255	255	255	255
B	164	197	194	196	190	225	226	216

计算过程中发现曝光量与颜色并不是一一对应的关系,同一曝光量可能与多种颜色相对应,因此彩色掩模在颜色选择上也可多样化,上表给出的数据只是一种符合条件的颜色组合.为了提高光刻边缘的锐度,保持二元光学元件良好的边缘特征,彩色掩模版上相邻两种颜色最好不要在同一条透过率曲线上选取.

### 3 实验结果

根据表 2 的数据绘制出掩模图形,进行曝光实验.自行设计的曝光系统框图如图 4.它包括光源、扩束准直装置、反射镜、精缩物镜等几部分.以 16 阶菲涅尔透镜为例,图 5 给出了光刻胶上的图形,图 6 是曝光重构图.结果表明,该方法基本能实现二元光

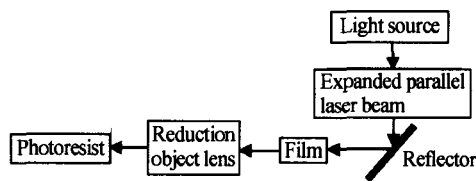


图 4 曝光系统图

Fig. 4 Block diagram of the exposure system

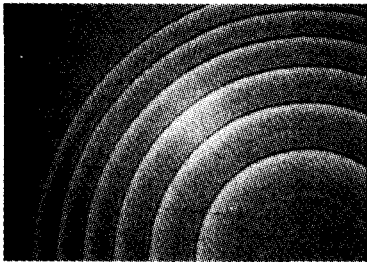


图 5 16 阶菲涅尔透镜光刻胶上图形

Fig. 5 Photograph of sixteen-step fresnel

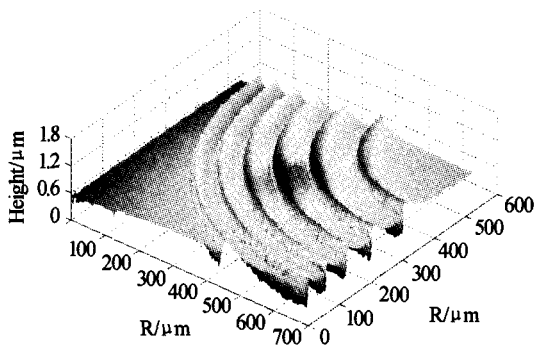


图 6 16 阶菲涅尔透镜曝光重构图

Fig. 6 Reconstruction pattern of sixteen-step fresnel

学元件台阶的线性变化.实验结果主要取决于胶片掩模质量的好坏.胶片的类型和洗印工艺的控制都会影响彩色影像的色平衡状况,从而影响透过率.

### 4 结论

采用胶片输出仪,利用彩色等效灰度理论制作

的彩色掩模,可以实现对曝光量的线性调制,使得制作出的二元光学元件台阶呈线性分布.鉴于彩色胶片输出仪丰富的颜色范围,可以得到某两个相邻灰度级间用原有灰阶分辨率无法实现的透过率,所以不仅能满足制作 16 阶二元光学元件的要求,甚至可以满足制作 32 或更高阶的二元光学元件的要求.与原有的激光打印和激光照排制作技术相比,掩模质量更高,颜色可选性更广.彩色掩模通过选择不同颜色,能控制元件台阶的高度成线性变化.实验结果表明利用该方法制作的彩色掩模,使得光刻台阶边缘更清晰.实验中用到的 9 组彩色是随机选定的.为了完善数据库,需要对大量的颜色进行透过率测量.

### 参考文献

- 1 Yu W X, Yuan X C, Ngo N Q, *et al.* Single-step fabrication of continuous surface relief micro-optical elements in hybrid sol-gel glass by laser direct writing. *Optical Express*, 2002, **10**(10): 443~448
- 2 Walter Daschner, Pin Long. Cost-effective mass fabrication of multilevel diffractive optical elements by use of a single exposure with a gray-scale mask on high-energy beam-sensitive glass. *Applied Optics*, 1997, **36**(20): 4675~4680
- 3 邓启凌,杜春雷,王长涛.连续表面微透镜阵列元件检测.光子学报,2004,**33**(11):1317~1320  
Deng Q L, Du C L, Wang C T. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1317~1320
- 4 邓启凌,杜春雷.微光学元件复制技术研究.光子学报,2002,**31**(1):114~117  
Deng Q L, Du C L. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 114~117
- 5 Shrauger V E, Erwin L L, Ahn J L, *et al.* Computer-generated multiple-phase-level holograms by use of color-printer techniques. *Applied Optics*, 1994, **33**(23): 5318~5327
- 6 金国藩,严瑛白,邬敏贤,等.二元光学.北京:国防工业出版社,1998.313~315  
Jin G F, Yan Y B, Wu M X, *et al.* *Binary Optics*. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 313~315
- 7 曹茂永,郁道银.高灰度分辨率图像的伪彩色编码.光学技术,2002,**28**(2):115~117  
Cao M Y, Yu D Y. *Optical Technique*, 2002, **28**(2): 115~117
- 8 谭力,向前涌,刘玉玲,等.激光数码冲印机颜色校正方法研究.光子学报,2004,**33**(6):765~768  
Tan L, Xiang Q Y, Liu Y L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 765~768

## Research of the Fabrication Method for Color-equivalent-gray Masks

Luo Ningning, Gao Yiqing, Shen Tingzheng, Qi Xinmin, Zhu Xiaojin, Chen Jinsong

*Department of Measurement and Control, Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang, Jiangxi 330034*

Received date: 2004-10-08

**Abstract** The database method, a new mask design method is presented, which is based on the color-equivalent-gray theory. Choosing different values of red, green and blue to form different colors, masks composed of these colors can be obtained by color film recorder. The output mask is used to linearly modulate the exposure. Consequently, the linearization of steps can be realized. The theoretical calculation and the experimental result of sixteen-step Fresnel are given. As a result, the database method is feasible. It provides a new approach for the gray expansion and has some referential meaning for the fabrication of DOEs.

**Keywords** Diffractive optics; Color-equivalent-gray; Color mask; Color film recorder

**Luo Ningning** was born in 1981 in Jiangxi province. She received B. S. degree in technology of measurement and control from Nanchang Institute of Aeronautical Technology in 2002. She presently is a graduate student of optical engineering of Nanchang Institute of Aeronautical Technology. Her major research fields include photoelectrical testing, precision instrument design, fabrication and applied technology of micro-optical apparatuses.

