

相位梯度条纹假彩色化的色度研究*

刘 立 人

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

用色散单棱镜和双棱镜,对谱衍射干涉和傅里叶滤波准光干涉的相位梯度条纹,进行周期性非对称和对称假彩色编码。本文用色度学方法统一计算和分析了编码色的色品,主波长,色度纯,光度和单色含量与相位梯度的关系。导出了各种系统获得最佳编码色的结构参数条件。同时还提出了双棱镜非重叠色散相补的对称彩色编码新方法。

关键词: 谱衍射干涉; 傅里叶滤波准光干涉; 假彩色编码; 色散; 色度学。

在光栅 Lau 干涉法^[1]和谱衍射干涉法^[2]的基础上,我们实现了用单棱镜^[3]和双棱镜^[4]产生相位梯度干涉条纹的非对称和对称周期性假彩色编码。前者对绝对值相同符号相反的梯度值产生不同的编码色,而后者产生相同的编码色。这首先得到了重复周期性彩色条纹。同时我们也在傅里叶滤波准光干涉法中用棱镜产生条纹假彩色编码^[5]。衍射干涉法较适用于弱变化相位体,滤波法特别适用于强变化相位体。由于这两种机理不同的方法有着相同的系统结构,因此同一系统可以测量变化范围极大的相位梯度。如可用于显微镜系统中,上述特点使这两种方法有着相当的应用前景。

事实上产生彩色条纹的方法已有过许多种;如干涉,相衬和微分干涉中的白光效应^[6~8]、纹影法中的色散棱镜、楔型干涉滤波器和彩色滤波器等^[9,10],相衬法中的厚相板色散和二色性滤光器等^[6,7]。但是所有这些方法都不能产生多周期重复性的彩色变化。

在我们以前的报道中只给出了原理上的解析分析,编码色的色品事实上并不清楚,系统结构参数的最佳选择也不明确。本文将用色度学方法对单棱镜和双棱镜的衍射干涉和滤波准干涉的假彩色编码进行统一的数值计算。研究编码色的色品,主波长,光度,色度纯和单色含量与相位梯度的关系,确定系统的最佳参数选择。计算和分析表明各种系统均有一个最佳工作条件。这为系统的设计提供了精确的依据。基此,本文还提出了双棱镜非重叠色散相补的对称彩色编码的新方法。

一、原理分析

典型结构见图 1。两光栅相互成像,由于被测物的相位变化使光栅 g_1 的像相对于光栅 g_2 产生移动,从而引起像点亮度的变化,即在像观察面上出现明暗交替的条纹。加入单棱镜后,将产生 g_1 色散像,这导致条纹彩色化,而加入双棱镜时,产生两个色散相反的 g_1 色散

收稿日期: 1987年9月2日; 收到修改稿日期: 1988年1月11日

* 本工作得到国家自然科学基金的资助。

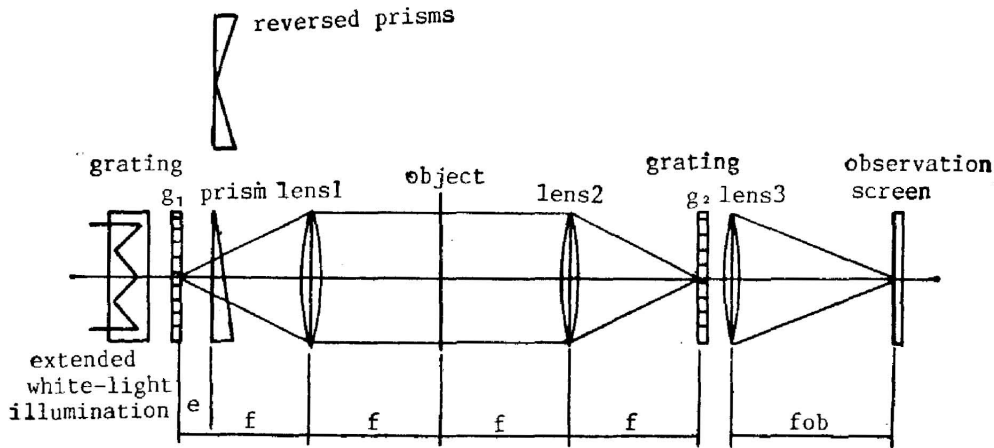


Fig. 1 The typical arrangement

像, 因此不论相位梯度的正负, 将得到相同的颜色。

为方便起见, 被测相位梯度用等效折射角来表示: (对应编码色一个变化周期的值为 $\Delta\theta_x = T/f$)。

$$\theta_x(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial\varphi(x, y)}{\partial x} \quad (1)$$

若光栅的衍射可忽略不计, 即 $\lambda f/T \approx 0$, 并且物体为强变化相位体, 折射角较大即 $\theta_x \gg T/2f$ 。这时等效折射角的等位线条纹为强度滤波产生^[11], 像点光强与光栅透过率有关。相当于微分干涉条纹。若光栅的衍射较大, 同时物体为弱变化相位体, 折射角较小, 这时产生谱衍射干涉^[2], 像点光场与光栅透过率有关。当衍射产生的剪切量小于物体细节时属于微分干涉, 否则是横向剪切干涉。

根据文献[3]对文献[2]的推导, 像点光强用空域表达式物理意义明确。综合文献[2]~[5]和[11], 有如下公式:

衍射干涉

单棱镜

$$I_{d1}(-Mx, -My, \Delta\lambda) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \sum_n \text{Rect}\left(\frac{\alpha - nT}{D_1}\right) \times \sum_m \text{Rect}\left(\frac{\alpha - mT - f\theta_x(x, y) - k_1\Delta\lambda}{D_2}\right) d\alpha \right|^2, \quad (2)$$

双棱镜

$$I_{d2}(-Mx, -My, \Delta\lambda) = \frac{1}{2} I_{d1}(-Mx, -My, \Delta\lambda) + \frac{1}{2} I(-Mx, -My, -\Delta\lambda). \quad (3)$$

滤波准干涉

单棱镜

$$I_{f1}(-Mx, -My, \Delta\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_n \text{Rect}\left(\frac{\alpha - nT}{D_1}\right) \sum_m \text{Rect}\left(\frac{\alpha - mT - f\theta_x(x, y) - K_1\Delta\lambda}{D_2}\right) d\alpha, \quad (4)$$

双棱镜

$$I_{f2}(-Mx, -My, \Delta\lambda) = \frac{1}{2} I_{f1}(-Mx, -My, \Delta\lambda) + \frac{1}{2} I_{f1}(-Mx, -My, -\Delta\lambda). \quad (5)$$

其中 T 为光栅周期, D_1 和 D_2 分别为 g_1 光栅和 g_2 光栅的开口宽度。 $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, λ 为可视波长, λ_0 为系统校正的中心波长。 $M = f_{00}/f$ 为物体成像放大率。 K_1 为棱镜线色散率, 若可视波长带宽为 $\Delta\lambda_s$, 棱镜角色散率为 K_0 , 则光栅的色散宽度为

$$S = K_1 \Delta\lambda_s = K_0 l \Delta\lambda_0 \quad (6)$$

若白光源的光强光谱分布为 $S(\lambda)$ 时, 像点上总的光强为

$$I(-Mx, -My) = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I(-Mx, -My; \Delta\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

计算中设定光源为等能量光谱分析。这时事实上(2)~(5)式也表示了编码色的光强光谱分布。

二、编码色的色度学计算方法

已知像点编码色的光强光谱分布, 即可进行该颜色的色度学计算^[12, 13]。主要为求出编码色的色度学参数与折射角以及系统结构参数之间的关系。计算中可以考虑整个物面如一均匀的相度梯度和折射角, 使(2)~(5)式与坐标无关。同时也应对积分最大值作一个光栅周期的归一化。上述条件下记作(2)~(5)式的归一化光强光谱分布为 $\bar{I}(\lambda)$, 则编码色的三刺激值为

$$\begin{aligned} x &= \int \bar{I}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ y &= \int \bar{I}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ z &= \int \bar{I}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (8)$$

这里 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 为单位能量单色光分布系数, (1931年 CIE 标准观察者 2° 视野), 波长范围从 380 nm (λ_{\min}) 到 780 nm (λ_{\max})。波长间隔取 5 nm 或 10 nm。

其中 Y 为相对光度, 计算中还将用其最大值 Y_{\max} 归一化。

因此编码色的色品为

$$\begin{aligned} x &= X/x + Y + z \\ y &= Y/x + Y + z \end{aligned} \quad (9)$$

这决定了编码色在 CIE 色品图上的色品坐标。

在色品图上, 从白光源位置点到编码色坐标点的连线将与光谱舌形轨迹相交, 交点的光谱波长就是该编码色的主波长 W 。应当注意, 色区中的主波长要用其互补波长表示。

编码色中所含有的单色光光度与总光度之比例为其色度纯, 即

$$P_c = \frac{y(\lambda)}{y} \left(\frac{y - y(E)}{y(\lambda) - y(E)} \right) = \frac{y(\lambda)}{y} \left(\frac{x - x(E)}{x(\lambda) - x(E)} \right) \quad (10)$$

其中 $x(\lambda)$ 和 $y(\lambda)$ 为主波长上的色品, $x(E)$ 和 $y(E)$ 为白光源的色品。

因此编码色中所含有的单色光的光度为 $P_c Y$ 。 P_c 最大值是 1, 因而也可以对 $P_c Y$ 以 Y_{\max} 归一化。

具体计算步骤如下: 首先给定系统结构参数 D_1/T , D_2/T 和 T/S , 假设任一 $g = f\theta_0$ 值, 先标出 $\bar{I}(\lambda)$ 光强光谱分布值, 然后根据上述方法分别算出该 g 值下的色品坐标, 主波长,

光度, 光度纯和单色含量。 g 值的变化周期为 T , 因此实践上给出 $g=0, T/N, 2T/N, \dots, (N-1)T/N$ 共 N 个点进行连续运算, 解出一个编码色变化周期内的光度学参数的变化, 并且全部用曲线图表示。计算中 $N=40$ 。

数值计算采用了 PC 微机, 曲线图用绘图仪画出。

三、单棱镜系统的数值计算分析

1. 衍射干涉

为保证精确的衍射干涉, 要求光栅的衍射级次最好只有 0 和 ± 1 级。有两种选择:

一种是使 $D_1/T = D_2/T = 0.5$ 。经计算只有当 $T/S = 0.5 \sim 1$ 时有较大的编码色色域。另一种是使 $D_1/T = 0.5, D_2/T \approx 0$ 。这时也是在 $T/S = 0.5 \sim 1$ 时具有较大的色域。由 $\theta_e = 0$ 可以看出光强光谱曲线 $\bar{I}(\lambda)$ 如矩形, 编码色是理想色, 尽管光度较低, 但是属同色品光中的光度最大的色光。

图 2 给出了上述两种情况在 $T/S = 0.5$ 和 $T/S = 1$ 时的编码色各光度参数与折射角变量 g 之间的关系。色品图中, 小圆圈表示编码色在 $\theta_e = 0$ 时的轨迹起始点。等能量白光位于 $x = 0.3333$ 和 $y = 0.3333$ 的坐标上。色品图中封闭编码色域表示一个周期中的编码色的颜色变化范围, 对照 CIE 1931 年色品图上的颜色区域^[24], 可见 $T/S = 0.5 \sim 1$ 时编码色大致上可产生全部彩色。由图可见, 编码色的主波长在 380 nm 短波极端上时, 光度, 纯度和单色

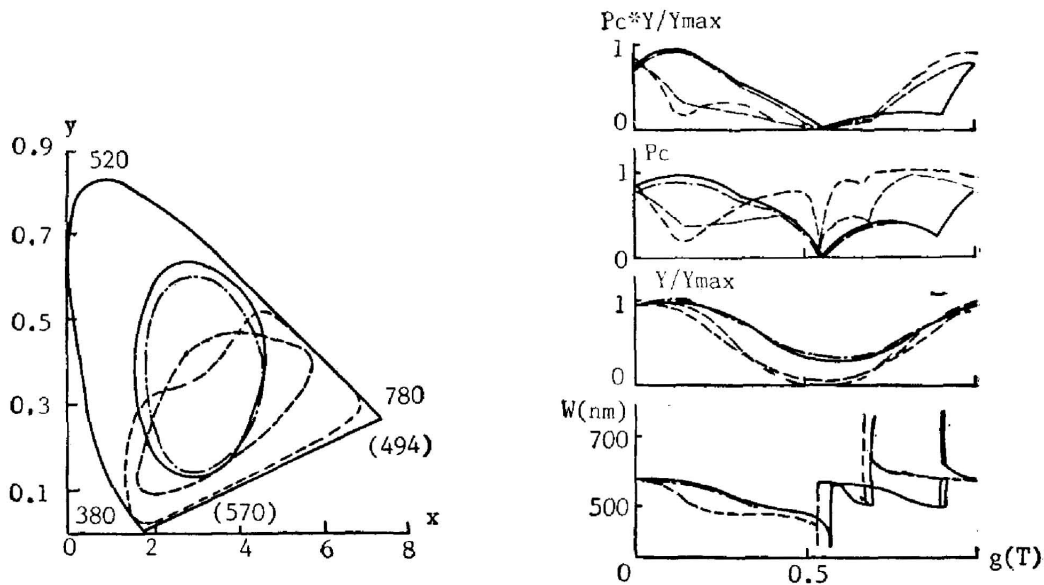


Fig. 2 The loci of the chromaticity coordinates the dominant wavelength, the luminance, the colorimetric purity and the luminance in the dominant wavelength of coding-color as a function of the equivalent angles of refraction, diffraction interferometry with a single prism.

	D_1/T	D_2/T	T/S	Y_{max}
— · — · —	0.5	0.5	0.5	0.1268
— · — · —	0.5	0.5	1	0.1774
— — — —	0.5	0.05	0.5	0.0019
— — — —	0.5	0.05	1	0.0024

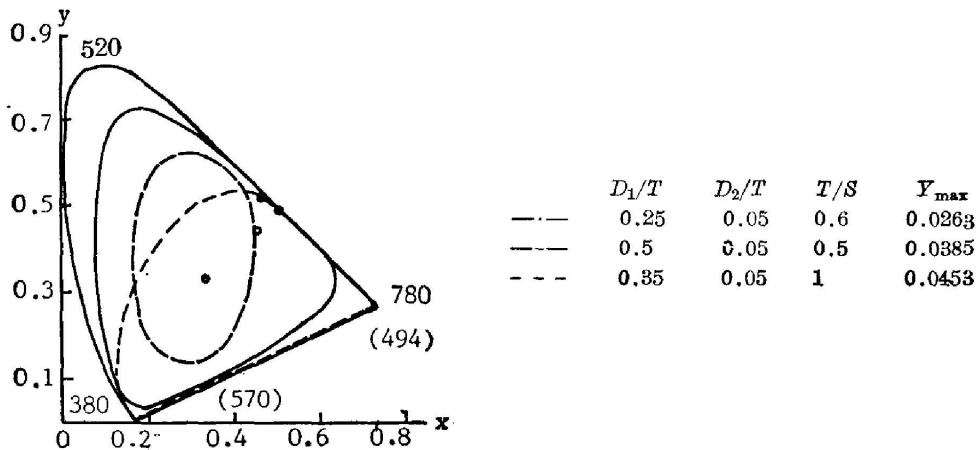


Fig. 3 The colorimetric loci of conding-color, quasi-interferometry with single prism

含量为最小。而在 600 nm 左右最大。

2. 滤波准光干涉

这时由于光栅开口比的选择不受限制,应当首先考虑产生理想色,使同色品光的光度最大,这要求产生矩形光强光谱分布,即一个光栅开口应接近零。进一步应使矩形两端截止波长为互补波长,这时编码色成为艳色。艳色是含单色光最多的理想色,颜色特别鲜艳。

由于互补波长对的分布是不均匀的,我们试探了不同的 D_1/T ($D_2/T \approx 0$) 和 S/T 的组合,得到了接近艳色的条件: $D_1/T \approx 0.3$, $T/S = 0.6$, ($D_2/T \approx 0$)。

图 3 给出了上述计算的比较,可见在近似艳色条件下 ($D_1/T = 0.25$, $D_2/T = 0.05$, $T/S = 0.6$), 单色含量 $P_c Y/Y_{max}$ 值在整个变化周期内均接近最大。同时也具有接近舌形线的编码色最大的色域。

四、双棱镜系统的数值计算分析

单棱镜系统中,编码色的主波长与折射角的关系曲线不存在纵轴对称性,因此绝对值相同而符号相反的相位梯度不可能具有相同的颜色,色散相反的双棱镜系统能产生对称的彩色编码,使绝对值相等的梯度值具有同一种颜色。

1. 衍射干涉

经计算,只有当 $D_1/T = D_2/T = 0.5$ 和 $T/S = 0.8 \sim 2$ 时有可能取得对称彩色编码。这过程中还要寻求最佳编码色域。原先两棱镜都对 λ_c 准直,假定两个色散光栅的相对位移这时为零,然后微调棱镜,使两色散光栅产生相对位移 t/T 。其中存在最佳的 t/T 值。模拟计算中取样 40 点,即令 $K = 40t/T$ 。图 4 给出了 $D_1/T = D_2/T = 0.5$ 和 $T/S = 0.8$ 的计算实例。其中封闭曲线是单棱镜编码光的色域。随折射角绝对值增加,编码色从 0 到 π 之间来回周期性地变化,可以看出 $K = 12 \sim 18$ 时编码色具有最合适的色域,它不通过白光光源品点而且近似具有红-绿-蓝的色品。尽管如此,编码色的色度纯较低,文献 [4] 的实验也出现这种现象。

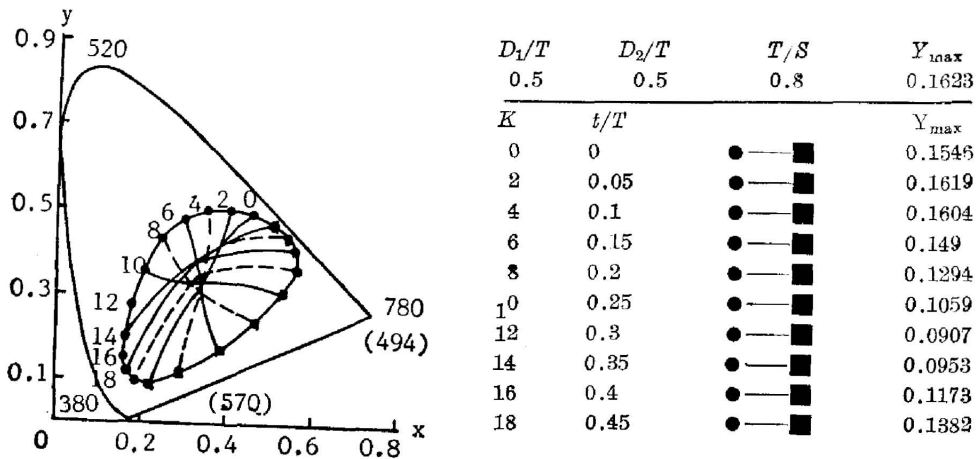


Fig. 4 The loci of chromaticity coordinates of coding-color as a function of the equivalent angles of diffraction with different start points K , diffraction interferometry with a pair of reversed prisms

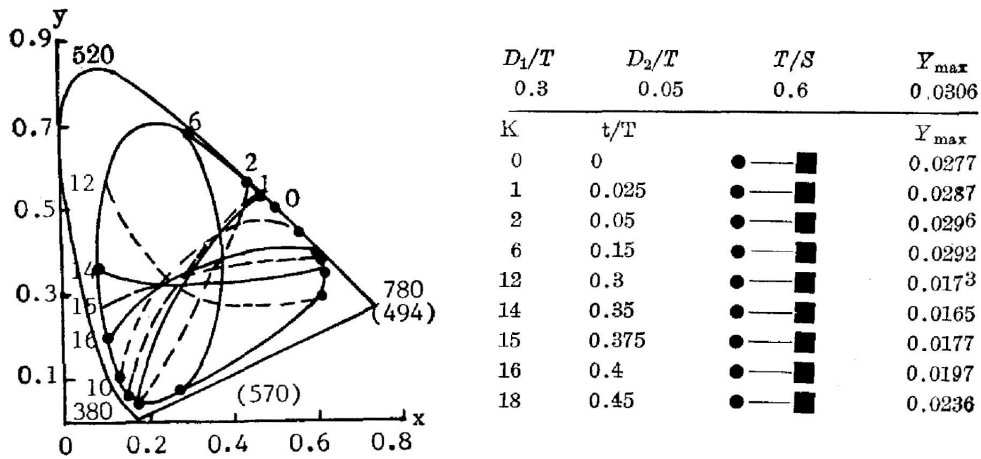


Fig. 5 The loci of chromaticity coordinates with different start points K , quasi-interferometry with a pair of reversed prisms

其它 D/T 和 T/S 条件下, 编码色域都通过白光色品点。因此不能使用。

2. 滤波准光干涉

计算表明也只有在近似艳色条件下才能取得最合适的对称编码色域。即 $D_1/T \approx 0.3$, $D_2/T \approx 0$ 和 $T/S = 0.6$ 。图 5 给出了一组计算实例, 可以看出当 $K = 15 \sim 18$ 时最好。

对称编码色的主波长与折射角之间关系应当具有纵轴对称性质。图 6 例子 ($K = 17$) 清楚地显示了主波长, 光度, 色度纯和单色含量的这一偶函数特征。

上述方法的特点是编码色由两棱镜的色光叠加而成。事实上当 S/T 较小时, 单棱镜系统会出现无光度的黑区^[3]。因此控制黑区的宽度为编码色变化周期之半, 并使两棱镜的有色区和黑区互补, 则也可产生对称编码色, 图 7 给出一个实例, 表明 $D_1/T = D_2/T \approx 0.1$ 和 $T/S \approx 3$ 是种最佳条件。

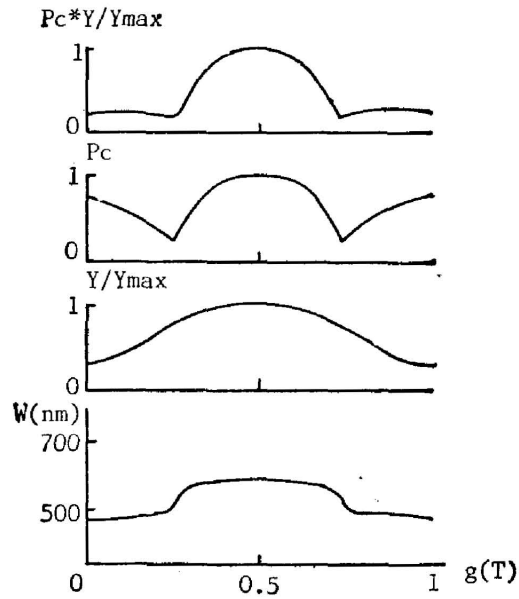


Fig. 6 The colorimetric loci whti a determinate value of K , quasi-interferometry with a pair of reversed prisms.

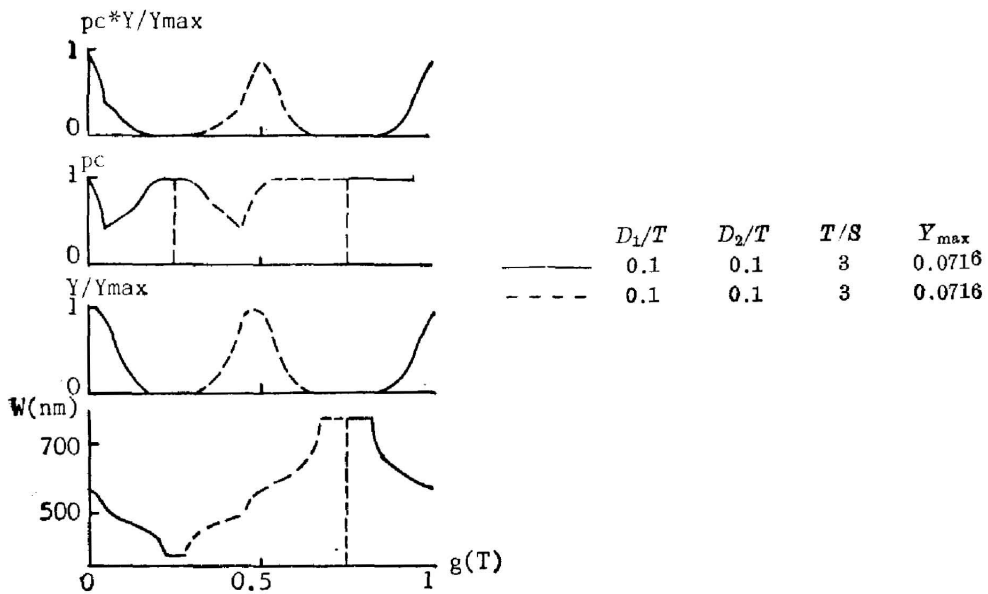


Fig. 7 The colorimetric loci of coding-color in quasi-interferometry with a pair of reversed prisms which have unoverlapped dispersions

五、结 语

本文的计算分析表明各系统都有一种最佳工作条件, 现总结如表所示。

prism systems	types of interference	
	difference interferometry	quasi-interference
single prism	$D_1/T = D_2/T = 0.5$ (or $D_2/T = 0.5, D_1/T \approx 0$) $T/S = 0.5 \sim 1$ (with wide color gamut)	$D_1/T \approx 0.3, D_2/T \approx 0, T/S = 0.6$ (gorgeous color)
double prism	$D_1/T = D_2/T = 0.5, T/S = 0.8 \sim 2$ $K = 12 \sim 18$ (adding colors)	$D_1/T \approx 0.3, D_2/T \approx 0, T/S = 0.6,$ $K = 15 \sim 18$ (adding colors)
		$D_1/T = D_2/T \approx 0.1, T/S \approx 3, K = 20$ (substituting colors)

参 考 文 献

- [1] H. O. Bartell, J. Jahns; *Opt. Comm.*, 1979, **30**, No. 3 (Sep), 268~274.
- [2] 刘立人;《光学学报》, 1984, **4**, No. 11 (Nov), 970~978.
- [3] 刘立人;《光学学报》, 1988, **8**, No. 11 (Nov), 1030~1037.
- [4] 刘立人;《光学学报》, 1988, **8**, No. 5 (May), 422~428.
- [5] L. Liu; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 19 (Oct), 3016~3023.
- [6] M. Pluta; *Advances in Optical & Electron Microscopy*, **6**, (Ed. R. Barer & V. E. Cosslett, Academic Press, London & New York, 1975), 49~133.
- [7] 弗朗松;《相衬显微镜和干涉显微镜》, (科学出版社 1966), 第四章。
- [8] 久保田广;《波动光学》, (科学出版社, 1983), 93~101.
- [9] J. R. Meyer-Arendt; *Advances in Optical & Electron Microscopy*, **8**, (Ed. R. Barer & V. E. Cosslett, Academic Press, London & New York, 1982), 1~22.
- [10] H. Wolter; *Handbuch der Physik*, **24**, (Ed. S. Flügge, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1956), 555~621.
- [11] L. Liu *Appl. Opt.*, 1982, **21**, No. 15 (Aug), 2817~2826.
- [12] G. Wyszecki, W. S. Stiles; *Color Science*, (Wiley, New York, 1982), Chapter 3.
- [13] 束越新;《颜色光学基础理论》, (山东科学技术出版社, 1981)。
- [14] 荆其诚等;《色度学》, (科学技术出版社, 1979), 280。

Colorimetry on pseudocolor-coded fringes of phase gradient

LIU LIREN

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 2 September 1987; revised 11 January 1988)

Abstract

Using a single prism or a pair of reversed prisms, asymmetric or symmetric periodic pseudocolor-coding of the phase gradient fringes in both spectrum-diffraction interferometry and Fourier-filtering quasi-interferometry can be realized. In this paper, the loci of the chromaticity coordinates, the dominant wavelength, the luminance, the colorimetric purity and the luminance in the dominant wavelength as a function of equivalent angles of refraction are calculated and analysed for all possible arrangements. The construction parameters for optimal color-coding are found exactly. Furthermore, a new idea for symmetric color-coding by two unoverlapped dispersions is suggested.

Key words: spectrum-diffraction interferometry; Fourier-filtering quasi-interferometry; pseudocolor coding; dispersion; Colorimetry.