第4卷 第8期
1984年8月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol 4, No. 8
August, 1984

银盐干板漂白后的相位编码在光学图像处理应用中的几个问题

龚 谦 李正明 母国光
(南开大学物理系)

提 要

本文以Ronchi栅为例，讨论了银盐干板漂白后形成的透射型相位编码片在白光图像处理应用中的几个问题：1. 相位变化在一定范围内，和未漂白的编码片再现同样的图像，但衍射效率有所提高；2. 相位变化超过一定范围，会产生密度假彩色化的现象；3. 应用于假彩色密度编码时所出现的问题；4. 其它形式的相位编码片，也有同样现象出现。文中给出理论分析和实验结果。

一、引 言

近几年来，随着白光信息处理的兴起[1~4]，提高各种编码片的衍射效率，以进一步改善白光信息处理的质量，成为大家颇感兴趣的问题，然而，由对振幅型编码片进行漂白而得到的相位型编码片[5,6]能否解决此问题，是值得研究的。

关于漂白的机理，许多文章都有所论述[7]。但是，对于编码片漂白后在白光图像处理系统中的成像情况，至今尚未见到全面报道。本文将就此进行详细分析和讨论。我们看到，漂白后的相位型全息图和各种编码片，应用于图像存储时，可以提高衍射效率；但是，当相位起伏量达到一定值后，如继续增加，就会出现单色光再现时的对比度(contrast)分布失真的现象，这样的编码片已不能用于图像存储，但如果把此编码片放入白光系统中，却出现了密度假彩色化的现象。本文主要以Ronchi栅为例，讨论了在对比度不失真情况下，相位型编码片的衍射效率和将假彩色现象应用于图像的假彩色密度编码中所存在的问题。

二、原 理

先将编码片漂白，然后将其放入白光处理系统的输入平面，进而考察其频谱平面和输出平面的光场分布情况。

首先讨论Ronchi光栅编码片漂白后的情况。

用一周期为$2a$的Ronchi栅对一强度透过率为$t(x, y)$的透明片进行编码，编码片上的曝光量可写为：

$$E(x, y)=[(1/2a)\,\mathrm{comb}(x/2a)\circledast\mathrm{rect}(x/a)]\cdot t(x, y)\cdot t, \tag{1}$$

这里，t是曝光时间，可看作常数。

漂白后，得到的是一具有不同起伏量的矩形相位光栅。下面，就曝光量大和小两种情况

收稿日期：1983年10月26日；收到修改稿日期：1984年1月12日

分别讨论。

1. 曝光量较小的情形

首先，作出曝光量较小时曝光量和起伏量 Δl 的关系曲线，如图1所示。曝光量是由阶梯减光板来控制的。从图中可以看出，曝光量和 Δl 成正比，即 $\Delta l=cE(x, y)$，c 是一个比例常数，不同的漂白方法，不同的干板，不同的空间频率，c 值是不同的。我们所作的曲线中，Δl 和曝光量成正比时，Δl 的最大值约为300 nm。

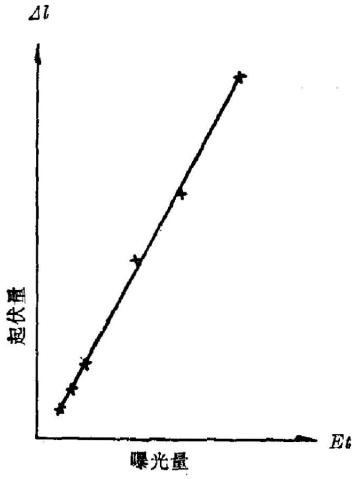


图1 曝光量 Et 和起伏量 Δl 的关系曲线

Fig. 1 Exposure-relief height curve

如果我们认为漂白后的透明片是纯相位型的，则编码片的振幅透过率为：

$$t_e(x, y)=\exp(i2\pi n'\Delta l/\lambda)=\exp(2\pi i n'cE(x, y)/\lambda),$$

这里 $n'=n-n_0$，n 是漂白后乳胶的折射率，n_0 是空气的折射率。

令 $(2\pi n'/\lambda)c=c'$，则有

$$t_e(x, y)=\exp[ic'E(x, y)]。$$

因为 $E(x, y)$ 较小，有近似关系式 $\exp[ic'E(x, y)]=1+ic'E(x, y)$ 成立，用透镜进行傅里叶变换后，频谱平面的振幅分布为：

$$A_f(f_x, f_y)=\mathscr{F}\{t_e(x, y)\}$$
$$=\delta(f_x, f_y)+ic'\iint_{-\infty}^{\infty}E(x, y)\exp[-i2\pi(f_xx+f_yy)]dx\,dy, \tag{2}$$

这里 $\mathscr{F}\{\cdots\}$ 表示傅里叶变换，$f_x=x_f/\lambda_f$，$f_y=y_f/\lambda_f$，(x_f, y_f) 是频谱平面坐标，f 是透镜焦距。

将(1)式代入(2)式，则有

$$A_f(f_x, f_y)=\delta(f_x, f_y)+ic'\mathscr{F}\{t(x, y)\}\circledast[\mathrm{comb}(2af_x)\sin c(af_x)]。 \tag{3}$$

由(3)式可以看出，除了第一项 $\delta(f_x, f_y)$ 外，第二项和漂白前的振幅型编码片只差一个复常数因子 ic'，其中 c' 只对衍射效率的大小有影响，对成像质量没有影响，而 i 对强度不起作用。第一项 $\delta(f_x, f_y)$ 只对零级有影响。因此，空间滤波时取零级外的任一级次，都能得到完好的再现像。

2. 曝光量较大的情形

在曝光量较大时，起伏量仍然是随着曝光量的增加而增加的，但两者间不再有线性关系，Δl 和曝光量、密度之间的关系较复杂，很难推导出一个普遍公式。但是，可以通过对编码片上等密度区域的分析，把经频谱平面滤波后像平面的情况大致描述出来。

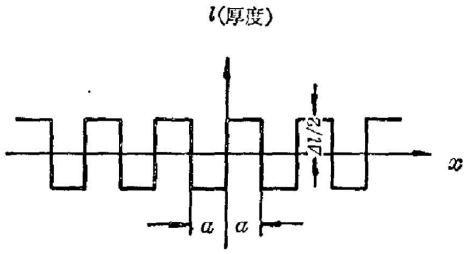


图2 漂白后的光栅编码片乳胶截面图

Fig. 2 Cross section of grating encoding plate after bleaching

假定原透明片密度为 D 处，漂白后的起伏量为 Δl，则编码片上乳胶截面如图2所示，其振幅透过率为：

$$t_e(x)=(1/2a)\,\mathrm{comb}(x/2a)\circledast g(x), \tag{4}$$

这里 $g(x)=\begin{cases}\exp(i\alpha) & (-a\leqslant x\leqslant 0),\\ \exp(-i\alpha) & (0<x\leqslant a),\\ 0 & (\text{其它}),\end{cases}$

式中 $\alpha=n'\pi\Delta l/2\lambda$, $g(x)$代表一个周期的位相分布。

频谱平面的振幅分布是(4)式的傅里叶变换,其表达式为

$$A_f(f_x)=\mathscr{F}\{(1/2a)\,\mathrm{comb}(x/2a)\}\cdot\mathscr{F}\{g(x)\},$$

$$\because\quad \mathscr{F}\{g(x)\}=\frac{2}{\pi f_x}\sin(a\pi f_x)\cos(\alpha+a\pi f_x),$$

$$\mathscr{F}\left\{\frac{1}{2a}\mathrm{comb}\left(\frac{x}{2a}\right)\right\}=\mathrm{comb}(2af_x),$$

$$\therefore\quad A_f(f_x)=\frac{2}{\pi f_x}\sin(a\pi f_x)\cos(\alpha+a\pi f_x)\,\mathrm{comb}(2af_x)。$$

对于任意一个衍射级次 m, 振幅分布为:

$$A_{fm}(f_x)=\frac{1}{\pi af_x}\sin(a\pi f_x)\cos(\alpha+a\pi f_x)\,\delta\left(f_x-\frac{m}{2a}\right)。$$

这时,像平面上的振幅分布为:

$$A_m=\mathscr{F}\{A_{fm}(f_x)\}=(2/\pi m)\sin(\pi m/2)\cos[\pi n'\Delta l/\lambda+m\pi/2]\exp(-im\pi x'/a),$$

其中 x' 是像平面上坐标。

光强分布则为

$$I_m=(4/\pi^2m^2)\sin^2(\pi m/2)\cos^2(\pi n'4l/\lambda+m\pi/2)。\tag{5}$$

对此式分单色光和白光两种情况来讨论。

a. 单色光再现

我们知道, Δl 是随原透明片黑度值的增大而增大的, 但由 (5) 式可知, 在 λ 为常数时, 光强是随 Δl 成正弦或余弦变化的,因此, 不论用什么波长, 也不论取哪一级次, 都只能得到对此度严重失真的图像。

如取零级,光强分布为

$$I_0=\cos^2(\pi n'\Delta l/\lambda)。\tag{6}$$

如取 1 级,则有

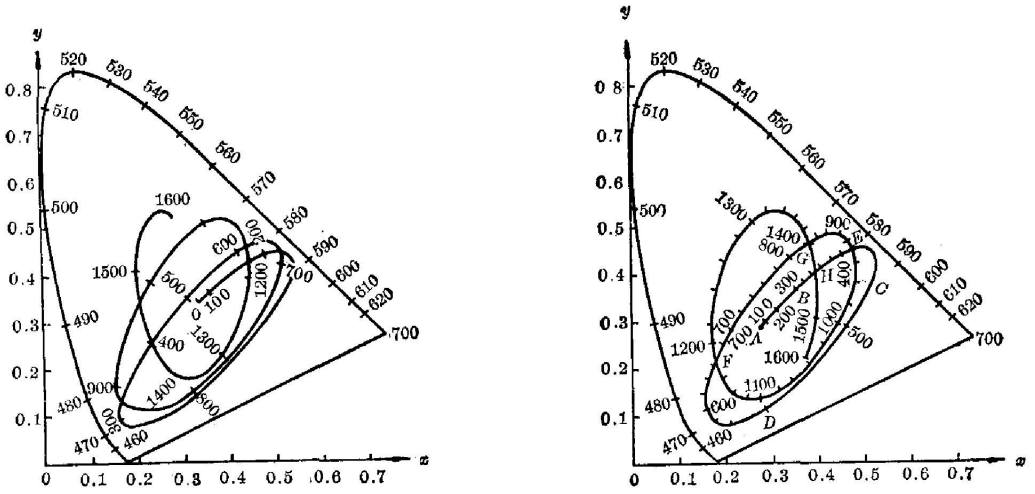
$$I_1=(4/\pi^2)\sin^2(\pi n'\Delta l/\lambda)。\tag{7}$$

由(6)、(7)两式可知,零级和 1 级都是对比度严重失真的图像,但两者的对比度相反。

一般来说,只要把 Δl 控制在 $\lambda/2n'$以内,就不会出现对比度失真的现象,在要求不很高的情况下, 仍可看作是不错的图像, 这时最大衍射效率可由漂白前的 $1/\pi^2$ 提高到 $4/\pi^2$, 增加 4 倍。

b. 白光再现

由(5)式可以看出,在白光处理系统中, 光强 I_m 是 λ 和 $n'\Delta l$ 两个变量的函数, 对于一个确定的 Δl, 有一条特定的光谱分布曲线, 根据色度学理论, 只要知道了光谱分布曲线, 就可以计算出其对应的色度坐标, 并从色度图中定出颜色。我们分别计算了零级和 1 级不同的 $n'\Delta l$ 所对应的色坐标,并在色度图上画出了对应的曲线,如图 3 所示, 其中(a)表示零级的情



(a) 零级 (b) 1级

(曲线上数字是 $n'\Delta l$ 值，单位是 nm)

图 3 颜色和 $n'\Delta l$ 的关系

Fig. 3 Relation between colour and $n'\Delta l$

(a) for zeroth order; (b) for first order (The number on the curves is the value of $n'\Delta l$, unit is nm)

况，(b)表示 1 级的情况。从这两个图中可以看到，不论零级还是 1 级，颜色均随 $n'\Delta l$ 值而变化，我们主要以 1 级为例来说明：

i) 在 $A\sim B$ 之间，曲线处于色度图的中心部位，基本上可以看作是无色的。

ii) 超过 B 之后一直到 M，颜色均随 $n'\Delta l$ 值而变化，这种现象可以用于图像的假彩色化。

iii) 不同线段颜色变化的灵敏度不同，例如在此图的 $C\sim B$ 段，颜色变化最灵敏，$D\sim E$ 段次之，因此，用于假彩色化时，应控制曝光量，使之在 $C\sim D$ 或 $D\sim E$ 相应的区域。

iv) 图中的 E、F、G、H 点，是曲线相交之处，不同的 $n'\Delta l$ 对应相同的颜色，在色度学中称之为异谱同色，另外，在曲线 1000～1100 nm 波段和 500～540 nm 波段，曲线虽没有相交，却相隔很近，由于色分辨阈值的影响，仍不能被人眼所分辨，因此，用于假彩色密度编码时，会出现颜色的重复，如原透明片上有相交点处不同的 $n'\Delta l$ 所对应的密度相连接的地方，假彩色化后原有的差异消失了，会造成一些混乱。

v) 在(b)图中，$n'\Delta l=0$ 的情况不存在，(因 $n'\Delta l=0$ 时，不存在 1 级衍射)，因此 A 点值是 $n'\Delta l\to 0$ 时的值，在其它各处，零级和 1 级的颜色为补色。

三、实验及结果

实验过程分编码和再现两步。

第一步：编码

将待编码的原透明片放在图 4 所示的 P_1 平面上，用 Ronchi 栅编码。曝光时将光栅放在感光干板上并紧贴乳胶面。所用的光源是白光光源。对曝光后的编码片进行显影、漂白处理。

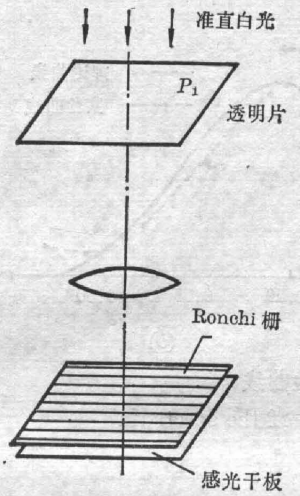


图 4　编码过程

Fig. 4　Encoding processing

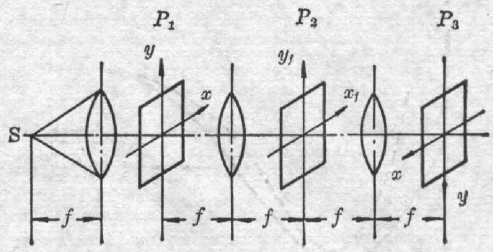


图 5　白光处理系统

Fig. 5　White-light processing system

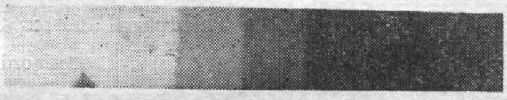


图 6　曝光量较小时再现的原物

Fig. 6　Reconstructing image for shorter exposure

第二步：再现

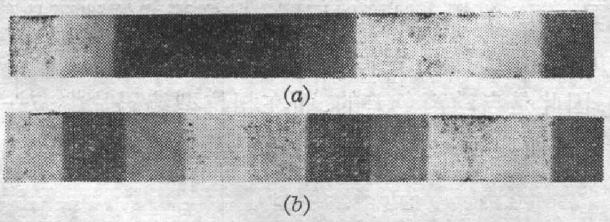
将漂白后的编码片放在图 5 所示的 P_1 平面上，在 P_2 平面上放入空间滤波器，在 P_3 平面上观察所得结果。

1. 曝光量较小的情形

我们用一密度由小变大的阶梯减光板作为物。漂白后的编码片放在图 5 所示系统中，用白光光源照明，空间滤波取 1 级，再现结果如图 6 所示。可以看出，这时再现像和原物之间存在着一一对应的关系，没有彩色图像出现，也没有对比度失真现象，并可获得较高的衍射效率。

2. 曝光量较大的情形

仍用一块密度由小变大的阶梯减光板作为物，但编码时的曝光量较前次大。同样放入图 5 所示系统中，用红、绿两种单色光分别照明，空间滤波仍取 1 级，再现结果如图 7(*a*)，(*b*) 所示。从这两张图中可以明显看出，不论用哪种颜色的单色光再现，都只能得到一个对比度严重失真的图像。



(*a*)

(*b*)

图 7　曝光量较大时再现的对比度严重失真的图像

Fig. 7　Reconstructing image with contract distortion for longer exposure

(*a*) Reconstructing image with red light; (*b*) Reconstructing image with green light

图 8 所示的是阶梯减光板在白光系统中，空间滤波取 1 级时的再现结果，图中可以看到不同密度处出现了不同的颜色，但出现了颜色的重复，如灰度不同的第 4 阶和第 10 阶，第 6 阶和第 8 阶，都对应看同样颜色，这和前面的理论分析一致。因此，用这种方法对图像假彩

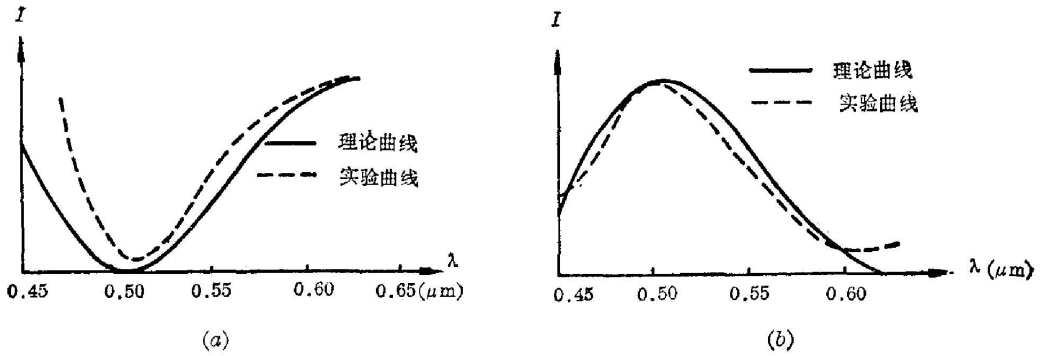


图9 光谱分布的理论曲线和实验曲线

Fig. 9 Theoretical and experimental curve of the spectrum

(a) for zeroth order; (b) for 1st order

色化时,需要控制曝光量和漂白方法,使 $n'\Delta l$ 的变化在一定范围之内,如果能将 $n'\Delta l$ 控制在图8的前7阶以内,就可以得到不重复的各种颜色。(图8见彩色插页——10)。

为了验证理论的正确性,我们测量了出现颜色灰色阶中的其中一阶在频谱平面上取零级和1级后的光谱分布情况。图9(a)、(b)分别是零级和1级光谱分布的实验曲线和理论曲线的比较。利用这条实验曲线,并在干涉显微镜下测出起伏量 Δl,还可以得出用其它方法不易测量的漂白后的光栅编码片的局部折射率。

需要指出的是,不同的干板和不同的漂白方法,开始出现颜色时的起伏量 Δl 很不相同,我们认为是由于不同的干板,不同的漂白方法使得乳胶的折射率不同所致。对于同一编码片上起伏量 Δl 不同之处,折射率的变化不大,它所导致的相位变化和 Δl 相比可以忽略。另外,从干涉显微镜下还可以看到,对于一张编码片,相位光栅凸起部分和凹陷部分的比例并不总保持在1:1,曝光量不同之处,比例是不同的。漂白后的相位光栅也不完全是矩形的,而是梯形的,因此,使得实验结果和理论推导略有差异。

四、其它形式的编码片

尽管以上讨论是Ronchi光栅,但可以证明,其它形式的编码片(如正弦栅、半色调屏、散斑等),只要漂白后成为相位型的,皆可适用。因为在振幅型编码片中,不论对哪种波长,衍射效率都是相同的,因此是自动消色差的,而在相位型编码片中,对一个确定的起伏量 Δl,相位和衍射效率都随波长而变化,这种编码片不是消色差的,都会出现密度假彩色化的现象。

五、小 结

本文较详细地讨论了银盐干板漂白后形成的相位编码片的再现图像。可以看到:当 $n'\Delta l<\lambda/2$ 时,用单色光再现,则黑白灰度正比于原图像,衍射效率提高,在白光下没有明显的假彩色效果;当 $n'\Delta l>\lambda/2$ 时,出现了单色光再现时黑白图像对比度的严重失真,与此同

时，出现了白光下密度假彩色化的现象，如将 $n'\Delta l$ 控制在一个有限的动态范围内，可成为等密度假彩色，但动态范围继续扩大，则会出现不等密度对应同一颜色的现象，在这种情况下，就不能实现假彩色密度编码。

参 考 文 献

[1] W. Thomas Cathey; «*Optical Information Processing and Holography*», (John Wiley and Sons, 1974), 146.
[2] F. T. S. Yu *et al.*; *Opt. Lett.*, 1980, **5**, No. 1 (Jan), 11.
[3] G. G. Mu, C. K. Chiang, and H. K. Lu; *Opt. Lett.*, 1981, **6**, No. 8 (Aug), 389.
[4] F. T. S. Yu; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 14 (Jul), 2457.
[5] F. T. S. Yu, 庄松林, 母国光; «光学学报», 1981, **1**, No. 1 (Jan), 11.
[6] P. H. Ruterbusch, G. R. Gerhart, and F. T. S. Yu; «*White-Light Holography with a slide Projector*», Optical Engineering, (in press).
[7] H. M. Smith; *J. O. S. A.*, 1968, **58**, No. 4 (Apr), 533.

Image processing with bleaching silver halide plate

Gong Qian　Li Zhengming and Mu Gouguang

(*Department of Physics, Nankai University*)

(Received 26 October 1983; revised 12 January 1984)

Abstract

Several problems in the application of the phase encoding plate formed by bleaching silver halide film in image processing is described. This paper consists of four parts: 1) when the phase change of the encoding plate is limited within the definite range, the output image after bleaching is the same as before; 2) when the phase change surpasses the definite range, the pseudocolor image appears; 3) the problems of the application for pseudocolor density encoding; 4) the pseudocolor phenomenon can also appear in the other type of the phase encoding plate. The theoretical analysis and experimental demonstration are offered in this paper also.