

利用氯化银乳胶光致二向色性 实现假彩色编码

张静方 于美文
(北京工业学院)

提 要

本文给出氯化银乳胶光致二向色性,以及光致双折射和透过率的测试结果,提供将多灰阶黑白图象的等灰度区域变成等二向色性区域的方法,说明等灰度假彩色编码的原理、特点和具体应用。本方法以白光为光源,具有彩色可变的灵活性。

一、引 言

维格特 (F. Weigert) 于 1919 年叙述了氯化银乳胶先经自然光预曝光再用红色偏振光照明后成为单轴的和具有二向色性的性质,其光轴方向与入射光振动方向平行,并且二向色性为正^[1](即对寻常光的吸收系数较非常光大),此效应称为维格特效应。Jonathan 将此效应用于黑白透明片的衬度反转、图象相减和干涉计量中^[2~5]。我们采用不同的工艺做了与之相类似的实验^[6]。此外,我们用索列尔补偿器对此各向异性片的双折射和二向色性进行了具体测试,结果是在可见光谱范围内双折射性可以忽略不计,诱导时的曝光量和波长对二向色性有明显的响应,并以黄绿光的二向色性为最大。将均匀曝光诱导的各向异性片置于正交偏振器中(各向异性片的光轴与偏振片的振动方向成 45°),用白光照明,将检偏器的振动方向朝各向异性片的 O 轴方向微动,则可依次观察到黄、绿、蓝、紫等颜色;对用不同曝光量诱导的各向异性片,微动检偏器出现上述相同颜色时的角度不同;反之,将检偏器固定在某一位置时,二向色性不同的各向异性片出现不同的颜色。我们是将多灰阶的墨白图象看作各向异性片,此时的等灰阶区域就相当于等二向色性区域,将黑白图象置于垂直偏振器中,用白光照明,微微转动检偏器就可观察到多灰阶黑白图象形成的假彩色。

使我们感兴趣的是氯化银乳胶可以很容易地从目前最广泛应用的记录材料超微粒的银盐乳胶中得到。

二、氯化银乳胶各向异性片的制备

氯化银乳胶是用高分辨率银盐乳胶干板经过充分曝光、显影、定影、水洗,然后用 R10 (NaCl) 漂白液制得。我们用天津全息 I 型、II 型干板,以及 Agfa Gevaert 10E75 和 Kodak 649F 干板来制备,并进行了比较。

收稿日期: 1981年7月22日

用氯化银乳胶干板诱导各向异性有两种方法：一种是用自然光充分曝光使其变成红色，然后用红偏光照射；另一种是用白偏光直接曝光。通常是将偏振膜覆盖在干板上(得到线偏振光)，直接正对太阳曝光或用高压水银灯准直后的平行光曝光。这样利用维格特效应制得了各向异性片(以下简称 W 片)。设 W 片的两个主方向为 e 和 O 轴，起偏器 P 放在 W 片前，且 P 的振动方向与 W 片的主方向成 45° 。自然光通过 P 、 W 后成为振动方向为 V 的线偏振光(图 1)。

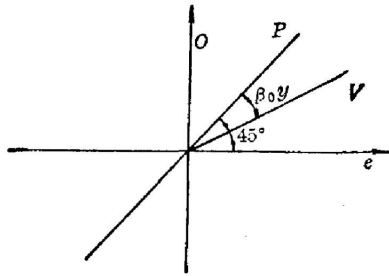


图 1

由于二向色性为正， V 的方向从 P 偏向 e 轴。我们用通过 P 、 W 后的黄光振动方向与 P 振动方向的夹角 β_{0y} 来表示该 W 片的二向色性的大小。

氯化银乳胶用白色线偏振光照明时，开始所诱导的二向色性随着曝光量的增大而增大。但到一定程度后，由于光分解以及氯化银转变的银受到明胶捕获氯原子能力的限制，致使延长照明时间，二向色性不再增加，形成稳定的银-氯化银系统。在达到最大曝光量之前，对于均匀

照明得到的 W 片，可以用 β_{0y} 的大小来表示诱导曝光量的大小。

三、氯化银乳胶光致二向色性和双折射的计算和测试

图 2 为光路图。 P 为起偏器， A 为检偏器， W 片置于 P 、 A 之间。其相对位置如图 3 所示： e 轴(x 轴)和 O 轴(y 轴)分别为 W 片的主方向， e 轴为诱导时偏光的振动方向。 P 与 x 轴夹角为 θ ， A 与 x 轴夹角为 α 。

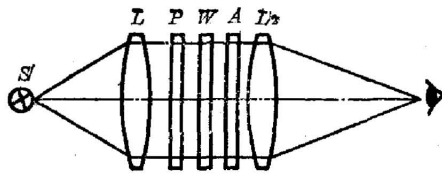


图 2

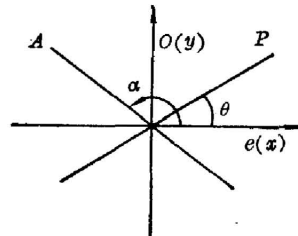


图 3

1. 计算

各元件的琼斯矩阵为

$$P: M_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \tag{1}$$

$$W: M_2 = t_e e^{i\phi_e} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & k e^{i\phi} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

其中： $k = \frac{t_o}{t_e} < 1$ ， $\phi = \phi_o - \phi_e = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) h$ ， t_e 、 t_o 分别为非常光、寻常光通过 W 片的透射系数； h 为乳胶层厚度； t_e 、 t_o 、 k 、 ϕ 、 $(n_e - n_o)$ 均为波长和曝光量的函数。

$$A: M_3 = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}. \tag{3}$$

设入射光振幅为 a , 通过 P 、 W 后, 由于 W 片的双折射, 一般为椭圆偏光, 它在检偏器 A 和与 A 垂直的坐标上的投影分别为 V_A 和 $V_{A\perp}$, 则

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_A \\ V_{A\perp} \end{bmatrix} &= M_3 \cdot M_2 \cdot M_1 \cdot a \\ &= a t_e e^{i\phi_e} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & k e^{i\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \\ &= a t_e e^{i\phi_e} \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \theta + k \sin \alpha \sin \theta e^{i\phi} \\ -\sin \alpha \cos \theta + k \cos \alpha \sin \theta e^{i\phi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

通过检偏器 A 的光强:

$$\begin{aligned} I_A = V_A \cdot V_A^* &= a^2 t_e^2 (\cos \alpha \cos \theta + k \sin \alpha \sin \theta)^2 \\ &\quad - k a^2 t_e^2 \sin 2\alpha \sin 2\theta \sin^2 \frac{\phi}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

2. 讨论

若双折射为零或双折射引起的光程差恰好为波长或波长的整数倍, 即 $\phi = 2m\pi$; $m = 0, 1, 2, \dots$, 则(5)式可写成:

$$I'_A = a^2 t_e^2 (\cos \alpha \cos \theta + k \sin \alpha \sin \theta)^2 \quad (6)$$

(1) 若 $A \perp P$, 即 $\alpha = \frac{\pi}{2} + \theta$ (如图 4 所示); 则

$$I'_A = \frac{1}{4} a^2 t_e^2 (k-1)^2 \sin^2 2\theta \quad (7)$$

当 $\theta = \frac{\pi}{4}$ 时, I'_A 有极大值, 故在 P 、 W 、 A 系统中, 均使 $\theta = \frac{\pi}{4}$ 。

当 $k \neq 1$, 有二向色性时, $I'_A \neq 0$, 即光通过正交偏振器中的 W 片时, 不为暗场。

(2) 当 $\theta = \frac{\pi}{4}$, α 为任意角时, 则

$$I'_A = \frac{1}{2} a^2 t_e^2 (\cos \alpha + k \sin \alpha)^2 \quad (8)$$

由于无双折射, 光通过 P 、 W 后为线偏振光 V , 设 V 与 x 轴夹角为 β , 与 P 夹角为 β_0 , 当 A 转到 A' 、 $A' \perp V$ 时, $I'_A = 0$ 。可得 $\text{ctg } \alpha_0 = -k$, $\text{tg } \beta = k$, $\beta_0 = \frac{\pi}{4} - \text{tg}^{-1} k$ 。

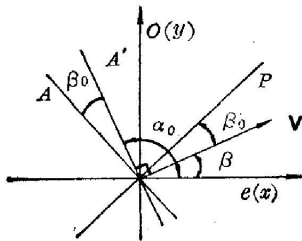


图 4

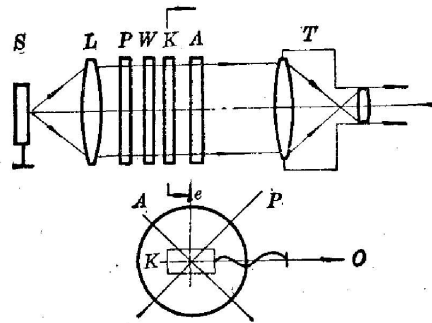


图 5

3. 测试

测试光路图如图 5 所示。 S 为光谱灯； L 为准直透镜； P 、 A 为偏振器； K 为索列尔补偿器； T 为望远镜。 K 的慢轴方向与 W 的 o 轴方向平行。

测得的双折射如图 6 所示。其中曲线 1 对应 $\beta_{oy} = 8.3^\circ$ ，曲线 2 对应 $\beta_{oy} = 11.4^\circ$ 的均匀 W 片。

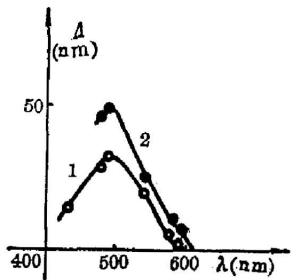


图 6

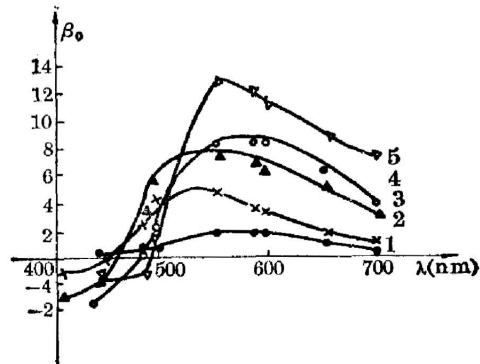


图 7

二向色性测试结果如图 7 所示。其中曲线 1, 2, 3, 4, 5 分别对应由不同曝光量诱导的 $\beta_{oy} = 1.6^\circ$ 、 3.5° 、 6.5° 、 8.3° 、 11.4° 的均匀 W 片。

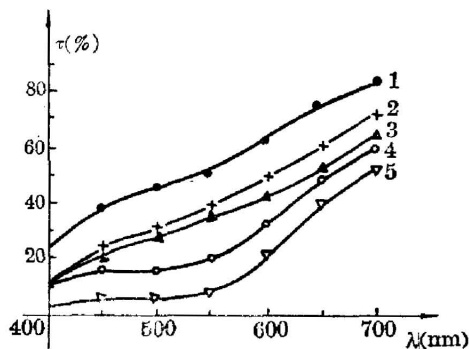


图 8

W 片的光谱透过率曲线如图 8 所示。

4. 结果分析

- (1) W 片的双折射相当于正晶体。
- (2) W 片的双折射因乳胶层薄，在整个可见光谱内可以忽略不计，可用 β_o 去代替 β'_o 。
- (3) 黄绿光二向色性最大。在可见光波段中二向色性大部分为正，但在短波方向二向色性变号，有不产生二向色性的波长。
- (4) 二向色性变号的波长附近双折射最大。

(5) 曝光量增大后， $\beta_{oy} > 10^\circ$ 时， W 片对短波方向的透过率显著下降。

四、黑白图象等灰阶域的假彩色编码

1. 多灰阶 W 片的制作

一种是将多灰阶的黑白透明负片覆盖在氯化银乳胶上，由偏振白光照射，直接晒出正像。缺点是能量损失大，对黑度大的区域，需要强光和长时间的诱导。

另一种是用高分辨率干板制作多灰阶黑白透明片的正片。然后漂白，得到氯化银乳胶干板。将此干板直接用偏振白光照射，晒出多灰阶 W 片。例如北京地区(北纬 40°) 在晴天时，室外中午正对太阳，夏天 10 分钟左右，春秋约半小时。黑度大的区域银颗粒密度大，漂白后形成的氯化银密度大，用偏振光照射后得到的多灰阶 W 片上光分解银的密度大，诱导出的二向色性 β_{oy} 大。反之，黑度小的区域诱导的二向色性 β_{oy} 小。这样就把透明片上黑白层次转变成相应的二向色性不同的晒出像。

2. 假彩色合成

对某二向色性区域, 设蓝、红、黄、绿波长的二向色性角分别为 β_{0B} 、 β_{0R} 、 β_{0Y} 、 β_{0G} , 光谱透过率为 τ_λ 。

当检偏器 $A \perp P$ 时, 白光通过 P 、 W 、 A 系统后的光强为上述各波长光通过系统后光强的混合(图 9)。即:

$$I = I_B + I_R + I_Y + I_G = \tau_B \sin^2 \beta_{0B} + \tau_R \sin^2 \beta_{0R} + \tau_Y \sin^2 \beta_{0Y} + \tau_G \sin^2 \beta_{0G}, \quad (9)$$

其中二向色性为正时, β_{0Y} 为正。

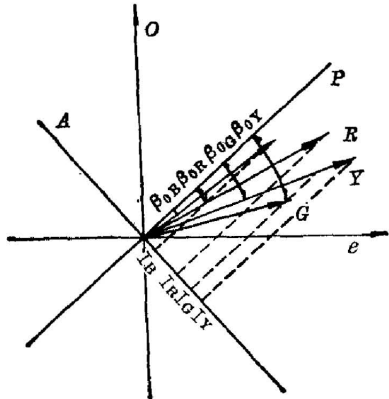


图 9

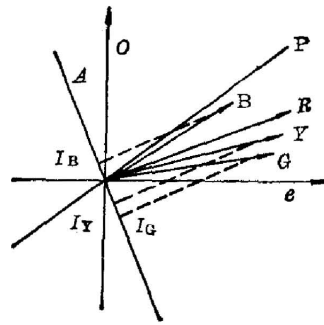


图 10

由于黄绿光的二向色性最强, 光谱透过率也大, 故对置于垂直偏振器中的 W 片, 通过白光可观察到黄绿色。

当检偏器 A 旋转到垂直于红光振动方向时(图 10), 有:

$$I' = I_B + I_Y + I_G = \tau_B \sin^2(\beta_{0B} - \beta_{0R}) + \tau_Y \sin^2(\beta_{0Y} - \beta_{0R}) + \tau_G \sin^2(\beta_{0G} - \beta_{0R}). \quad (10)$$

此时可观察到绿色。

同理, 当检偏器 A 继续向 O 方向旋转, 分别垂直于黄光、绿光振动方向时, 可观察到颜色向蓝色、紫红色过渡。

由前面测试知道, 对于 W 片上不同二向色性区域, 光谱透过率和二向色性角度不同。设 W 片上有 N 个等二向色性区域, 并且检偏器固定在从 $A \perp P$ 的位置向 O 方向转一微小角度 γ 的位置上, 则光通过系统后第 N 个等二向色性区域的光强为:

$$I_N = \tau_B^N \sin^2(\beta_{0B}^N - \gamma) + \tau_R^N \sin^2(\beta_{0R}^N - \gamma) + \tau_Y^N \sin^2(\beta_{0Y}^N - \gamma) + \tau_G^N \sin^2(\beta_{0G}^N - \gamma), \quad (11)$$

其中 τ_λ^N 、 $\beta_{0\lambda}^N$ 代表 W 片中第 N 个等二向色性区域的光谱透过率和各波长的二向色性角。

这样, 白光通过 P 、 W 、 A 后, 在不同二向色性区域中各波长按公式(11)重新混合成不同的颜色, 从而完成了等灰度的假彩色合成。

3. 观察、照相光路

观察光路可乘用图 2 的平行光路, 入射光与 P 、 W 、 A 垂直, 不产生系统误差。为观察方便和简便起见,

也可采用图 11 的光路。其中, L_1 为聚光镜, L_2 为透镜, 可直接将灯丝成像在检偏器 A 上,

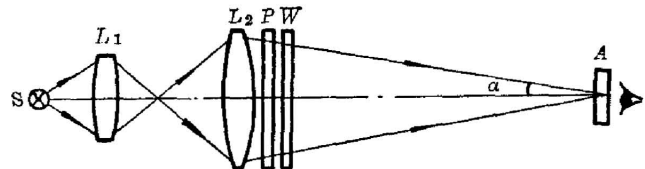


图 11

而眼睛通过像点观察。由于 W 片乳胶层很薄, 当 α 角小于 5° 时, 非平行光路带束的误差可以忽略。此时 A 的通光面积小, 可降低对偏振片的均匀性要求。

照相时, 在图 11 光路中将 A 稍向前移, 使灯丝像通过照相机入瞳即可。观察时, 我们采用 6 V 15 W 白炽灯泡, 照相时采用 12 V 50 W 放映灯泡。

为了使观察到的假彩色更符合等灰度区域, 要求干板乳胶层厚度均匀, 偏振片均匀。若使用胶合好的偏振片, 要求胶合应力均匀。透镜要消色差和球差, 并置于垂直偏振器之外。

五、讨 论

(1) 用多灰阶 W 片测得最大的二向色性角 β_{0Y} 小于 10° , 故检偏器 A 由固定在与 P 垂直的位置到向 O 方向旋转 10° 的任一位置上都能观察到假彩色。在其它位置, 观察到的是黄绿色或紫红色的多灰阶图像。图 12 为黑白卫星云图(左右方向与彩图相反), 图 13, 图 14 (见 152 页后彩图插页) 为检偏器 A 与起偏器 P 垂直时在附近观察到的假彩色的两边极限位置为黄绿色和蓝绿色的灰阶图。

(2) 检偏器 A 在上述范围内取不同位置, 即在公式(11)中取不同的 γ 值时, 同一种灰度的颜色会发生变化, 即同一张多灰阶黑白照片能合成颜色不同的彩色照片。但每一张彩色照片中的同一种颜色仍代表同一种灰度, 这就提高了鉴别灰度等级的能力。图 15, 图 16 (见 152 页后彩图插页) 为检偏器在不同位置时拍摄的卫星云图。其中图 15 是检偏器处于使灰阶小的部分为黄色的位置, 而整个黑白灰阶出现假彩色。图 16 是检偏器处于灰阶小的部分从黄色反转为蓝紫色的位置, 使小灰阶部分更突出。

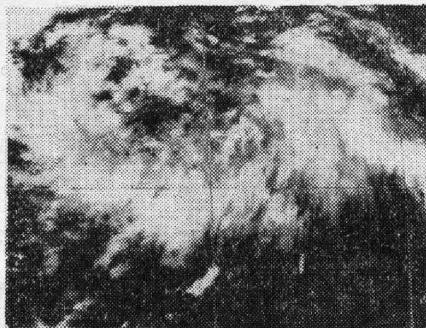


图 12

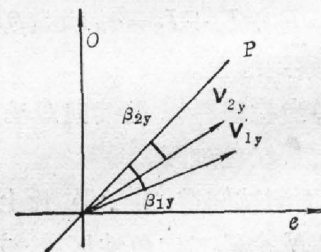


图 17

(3) 能实现基本彩色反转。设黑白图像有两种灰度, 制成 W 片后, 灰度大的区域二向色性角为 β_{1Y} 、灰度小的二向色性用 β_{2Y} (图 17)。由前知, 当检偏器 A 垂直于 V_{2Y} 时, 灰度小的区域呈蓝色, 灰度大的区域呈黄色。当 A 垂直于 V_{1Y} 时, 灰度小的区域呈黄色, 灰度大的区域呈蓝色。从黑白片上看, 灰度小的区域近于灰白色, 不易分辨。实现彩色反转后, 原来浅色区域变成了人眼灵敏色的紫蓝色。所以这种假彩色既可突出灰度大的部分, 又可突出灰度小的部分。如图 15、图 16 中黄色和蓝紫色部分。

(4) 连续地稍微转动检偏器 A 可以增加分辨灰度等级接近区域的能力。从上面可知, 当 A 从与 P 垂直的位置起向 O 方向微动时, 灰度小的区域首先变蓝, 蓝色区域逐渐向灰度大的区域过渡, 在蓝色区域的过渡中, 可以增加分辨灰度等级的能力。

(5) 可用诱导方向与多灰阶 W 片诱导方向垂直的均匀 W 片去提取某一灰度。若要提取灰度的二向色性角为 β_{0Y} , 则选择 $\beta'_{0Y} = -\beta_{0Y}$ (如图 18 所示) 的均匀 W 片, 将两 W 片的乳胶层对着乳胶层。组合后对这灰度区域来说相当于是各向同性的, 各波长的二向色性均为零。在垂直偏振器中, 该区域是黑的) 若检偏器 A 从垂直于起偏器 P 的角偏离, 该部分是亮的。但对另外某一灰度区域, 由于各波长的二向色性角与均匀 W 片各波长的二向色性角之差不是常数, 组合后的光谱透过率也会改变。当检偏器 A 固定时, 公式 (11) 变为:

$$I_N = \tau_B^N \sin^2(\beta_{0B}^N - \beta'_{0B} - \gamma) + \tau_R^N \sin^2(\beta_{0R}^N - \beta'_{0R} - \gamma) \\ + \tau_Y^N \sin^2(\beta_{0Y}^N - \beta'_{0Y} - \gamma) \\ + \tau_G^N \sin^2(\beta_{0G}^N - \beta'_{0G} - \gamma)。 \quad (12)$$

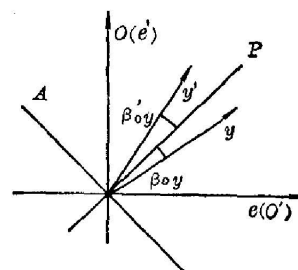


图 18

在所拍摄的照片上被截取灰度区域近白色, 其余灰度区域颜色会发生变化。图 19 (见 152 页后彩图插页) 就是加一均匀垂直 W 片拍摄的 (均匀 W 片乳胶厚度不均且有污点) 卫星云图。

(6) 稳定性。将淡红色 W 片置于正午阳光下自然光曝晒几小时直至深红色, 再测量其二向色性角, 偏差在仪器误差范围内。而观察和照相时的偏光强度不足以引起二向色性的变化。彩图的卫星云图 W 片是作者 1980 年 10 月制作的, 置于实验室纸盒内, 至今未观察到二向色性的变化。对于光分解银未饱和的 W 片, 与原来诱导方向相同的强偏振光可使其二向色性增加, 与之垂直的强偏振光可使其二向色性角减少, 甚至当曝光量超过第一次时, 对原方向而言可成负角度。但只要是均匀照射, 等灰度区仍然是等二向色性区, 不影响观察效果。为防止未饱和氯化银继续光分解银, 可将 W 片定影, 此时片子从红棕色转变为黄棕色, 置于正交偏振器中, 仍可观察到等灰度假彩色。

(7) Kodak 649F 干板乳胶层厚 $17 \mu\text{m}$ (全息 I、II 型乳胶厚 $6 \mu\text{m}$), 厚度均匀性好, 假彩色编码效果更好。

光致二向色性还可以作为空间假彩色编码。只要将黑白图像的不同部分给予不同的曝光时间, 诱导的偏振光方向可以在互相垂直的两个方向上选择。

为简化工艺, 我们发现天津无线电研究所生产的 HP-633 型干板用 He-Ne 红色偏振激光或白偏振激光曝光, 经 D-76 显影液 10 倍稀释显影、定影后, 有负二向色性。置于垂直偏振器中, 用白光观察, 有红、绿等颜色变化。这样有可能省去漂白和强偏振光诱导过程。但它需要的曝光量约为天津 I 型干板、D-19 显影时, 正常曝光量的 50 倍。关于这种方法我们正在进一步研究。

对光学实验室哈流柱、王民良两位同志所给予的帮助, 谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] F. Weigert; *Verh. Dtsch. Physik Ges.*, 1919, **21**, 479.
- [2] J. M. C. Jonathan, M. May; *Opt. Commun.*, 1979, **28**, No. 1 (Jan), 30.
- [3] J. M. C. Jonathan, M. May; *Opt. Commun.*, 1979, **28**, No. 3 (Mar), 295.
- [4] J. M. C. Jonathan, M. May; *Opt. Commun.*, 1979, **29**, No. 1 (Apr), 1.
- [5] J. M. C. Jonathan, M. May; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 4 (15 Feb), 624.
- [6] 于美文, 哈流柱; 北京工业学院学报, 1981 年 1 月 11 日, 37 页。

A pseudo-color encoder using photodichroism in silver chloride emulsion

ZHANG JINGFANG AND YU MEIWEN

(Beijing Institute of Technology)

(Received 22 July 1981)

Abstract

In this paper results of measurement on dichroism, birefringence and transmittance of silver-chloride emulsions are given. A method of turning the areas of equal grey levels of the multi-grey level black and white images to equal dichroism is provided. The theory, specialities and practical application of equal-density pseudocolor are presented. The anisotropic plate placed between crossed polarizers is illuminated by a parallel beam of white light, equal-density pseudocolor can be observed. Slightly turning the analyzer pseudocolor may be changed. Therefore a complex black and white photographic image transparency can be changed to an observable pseudocolor pattern. The method only needs a high resolution photographic plate and is characterized by considerable simplicity, stability and flexibility.