

文章编号: 0253-2239(2004)02-268-6

彩色负片印片颗粒指数的准确测定

徐艳芳¹ 刘文耀¹ 唐志健²

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)
(² 中国乐凯胶片集团公司, 保定 071054)

摘要: 分析了彩色负片印片颗粒指数 σ_{per} 实际测试中不同性能负片的测试特点和影响因素。印片颗粒指数的测试点应根据彩色负片的感光特性确定, 为正常扩印时对应正片 0.74 中灰密度的负片密度点。影响印片颗粒指数值的两个主要因素是彩色相纸的反差修正系数 a 和彩色负片的覆盖力系数 E_{CP} ; 建立了 a 和 E_{CP} 的实验求取方法, 并通过对几种负片参量的实际测定, 分析和说明了参量变化对印片颗粒指数数值的影响程度和应进行的修正。

关键词: 应用光学; 视觉颗粒性; 印片颗粒指数; 感光特性曲线; 彩色负片

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Accurate Measurement of Print Grain Index of Color Film

Xu Yanfang¹ Liu Wenyao¹ Tang Zhijian²

(¹ Key Laboratory of Opto-Electronic Information and Technical Science, Ministry of Education, College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)
(² China Lucky Film Group Corporation, Baoding 071054)

(Received 21 October 2002; revised 17 January 2003)

Abstract: The properties of the color film and the affecting factors when measuring the print grain index value have been analyzed. The film measuring point of print grain index should be made according to its light-sensitive characteristics, being the density corresponding to the 0.74 gray density of color paper when printing; the two main factors affecting print grain index accuracy are contrast amendment factor a of the color paper and cover power efficiency E_{CP} of the color film. The methods of obtaining a and E_{CP} are found, and these two efficiencies of several films have been measured. Finally, the print grain index amendment arising from the variation of $a(E_{\text{CP}})$ is calculated.

Key words: applied optics; visual graininess; print grain index; light-sensitive characteristic curve; color film

1 引 言

彩色负片的颗粒性能是一个重要的质量指标, 以往颗粒性能的度量采用均方根(RMS)颗粒度的方法。均方根颗粒度建立在只对彩色负片进行灰密度(白光调制)采样的基础之上, 难以保证所测数值与实际扩印照片效果相符合。建立在彩色负片红、绿、蓝三色颗粒度基础上的印片颗粒指数—— σ_{per} 测试方法^[1], 考虑了扩印过程中颗粒性能的传递特性

以及观察照片时人眼的视觉生理和心理特性等诸多因素, 形成了一个代表最终照片颗粒效果的知觉颗粒度, 能够反应彩色负片颗粒性的实际扩印效果。

印片颗粒指数数值表示为^[1]

$$\sigma_{\text{per}} = k \times \lg(\alpha\sigma_r^2 + \beta\sigma_g^2 + \rho\sigma_b^2)^{1/2} + k \times \lg(\gamma a E_{\text{CP}}) + m, \quad (1)$$

式中 σ_r 、 σ_g 、 σ_b 为彩色负片的红、绿、蓝三色颗粒度, k 、 α 、 β 、 ρ 、 γ 、 a 、 E_{CP} 及 m 均为系数值。在红、绿、蓝三色扩印性能相同和低于 12 倍放大的情况下有^[1]

$$\sigma_{\text{per}} = 105 \times \lg(0.24\sigma_r^2 + 0.66\sigma_g^2 + 0.10\sigma_b^2)^{1/2} - 40. \quad (2)$$

印片颗粒指数方法对测试密度、扩印系统、扩印条件

E-mail: fang912@21cn.com

收稿日期: 2002-11-21; 收到修改稿日期: 2003-01-17

及彩色相纸的性能都有一定的要求。在这些条件范围内印片颗粒指数能够很好地符合彩色负片的实际扩印颗粒效果,但在许多情况下,特别是特定的样片特性下,需对印片颗粒指数的测定做某种调整,或明晰其形成的偏差,使 σ_{per} 值的测定既有针对性,又有可比性,这是印片颗粒指数方法在实际应用中应注意和把握的原则。

本文从印片颗粒指数方法的标准要求入手,分析了在具体负片特性下印片颗粒指数测定应采取的措施及实际参量变化范围内的测试修正;此外,还对不同扩印放大倍数情况下的印片颗粒指数测试情况做了说明。

2 印片颗粒指数测试点的选择

2.1 彩色负片和彩色相纸的感光特性

彩色负片和彩色相纸的感光特性由其感光特性曲线^[2]描述。图 1 和图 2 分别给出了彩色负片和彩色相纸的其中一色感光特性曲线,横坐标代表曝光量,以曝光量的对数表示,纵坐标代表形成的带色染料量,以其阻光密度表示。原景物的亮度形成一定的曝光量 $\lg H$ 使彩色负片感光,形成一定的 M 状态光学密度 D_M ;彩色负片对扩印彩色相纸而言起着调制三色曝光量的作用,在扩印过程中, D_M 决定

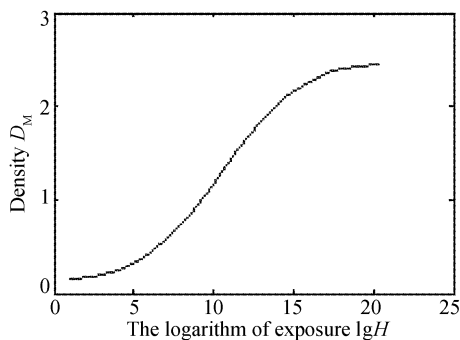


Fig. 1 Characteristic curve of color film (single layer)

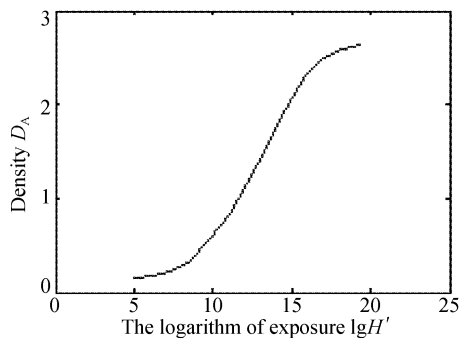


Fig. 2 Characteristic curve of color paper (single layer)

了彩纸的曝光量 $\lg H'$,形成彩纸上一定的带色染料量和对应的 A 状态光学密度 D_A 。彩纸上达到灰色调的情况下,三色特性曲线应重合,即彩纸上的灰色应有相同的三色 A 状态密度和反差系数。

2.2 印片颗粒指数方法测试点的选择

彩色负片的三色颗粒度会随其密度的不同而变化,图 3 为实际测定的一彩色负片的三色颗粒度随密度变化的关系曲线。实践表明,这种变化关系没有固定的形式,只能实际测定。不同点的颗粒度如何转化在彩纸上表现出来,哪一密度点的颗粒度最具代表性,是表征彩色负片颗粒性能的根本出发点。

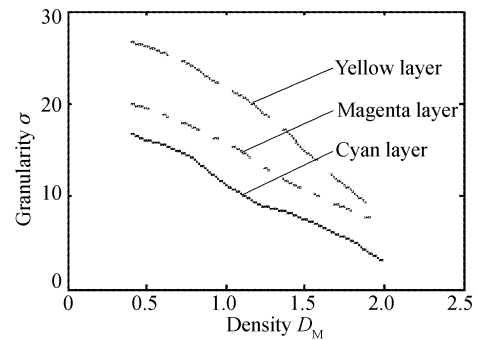


Fig. 3 The relation between the granularity and the density in color film

景物 18% 反射率的灰是人眼感觉的中等灰度,理论和实验^[3]指出,彩色负片上特性曲线线性部位中部的三色密度应对应 18% 的灰景物,即在彩纸上还原为 0.74 左右密度的灰色。从特性曲线看,正常曝光情况下,彩色负片特性曲线线性部位中点基本与彩纸特性曲线中部 0.74 的灰相对应。表 1 给出了六个负片实验样品在正常曝光下、设备正常扩印、正常还原 18% 灰时对应负片的红、绿、蓝三色密度值和负片样品感光测定特性曲线中部的三色密度值。所给密度值均减去了彩色负片固有基色形成的灰雾密度。

Table 1 The density above the fog in color film corresponding to the density of 0.74 in color paper

Sample numbers	Regular printing			Measuring with characteristic curve		
	D_r	D_g	D_b	D_r	D_g	D_b
S-1	0.60	0.72	0.77	0.67	0.76	0.86
S-2	0.58	0.74	0.62	0.72	0.83	0.96
S-3	0.86	0.97	1.13	0.82	0.93	1.00
S-4	0.95	1.01	1.25	0.80	0.96	1.19
S-5	0.77	0.97	1.26	0.70	0.95	1.23
S-6	0.87	0.93	0.96	0.95	0.96	1.03

表中数据表明,在彩纸上形成 0.74 灰密度点所对应的负片三色密度并不完全相同。其一是因为不同负片感光灵敏度不同,即使在标称感光度相同时也有个体差异,在正常曝光下,对同一景物亮度会形成不同的密度;其二是因为扩印设备会根据整幅负片总透光强度自动调整曝光强度,得到正常的亮度还原。特性曲线中点数据表明,不同负片其中点三色密度也不相同。

Topfer 和 Jacobson^[4]在对常规彩卷的实验给出,实扩(放大 11.3 倍)的大面积灰色调中,彩纸上灰密度在 0.5 到 1.5 范围内人眼有颗粒感觉,而 0.7 到 1.3 密度范围颗粒感最明显,0.74(18%)的灰密度处于最敏感的部位。

由此,本文实验中选择彩色相纸上 0.74 的灰密度作为印片颗粒指数方法针对的目标灰密度,同时认为,相应的负片密度测试点的选择应根据负片的感光特性性能确定。

绿色是人眼最敏感的颜色,上述 Topfer 和 Jacobson 的试验中彩色负片和彩纸均以绿光形成的密度 D_g 为准。印片颗粒指数方法形成的知觉颗粒度组合中也是 σ_g 占最大的权重[见(2)式];表 1 数据也表明,还原 18% 的灰和负片特性曲线中部 D_g 具有较好的规律性。由此,本实验彩色负片密度级的适当选取以绿密度 D_g 为准,并将负片按特性曲线线性部位中点绿密度 D_g 为 1.0 左右和 0.8 左右分为两类,分别将负片绿密度为 1.0 和 0.8 的密度级作为印片颗粒指数方法中的负片三色颗粒度测试点。

对六个柯达彩色负片进行了特性曲线及 σ_{per} 值测试。其特性曲线中部绿密度 D_g 接近 1.0,选取 D_g 为 1.0 为测试点,表 2 给出了实验测试结果和公布值,比较可见有较好的一致性。

在一组特性曲线中部绿密度接近 0.8 的样片实验中,选择 0.8 为印片颗粒指数求取测试点,印片颗粒指数值与实拍效果比较情况列入表 3。

Table 2 The granularities and σ_{per} values of Kodak color films

Film names	σ_r	σ_g	σ_b	$\sigma_{\text{per}}(12\times)$ (Measured)	$\sigma_{\text{per}}(12\times)$ (Published)
Kd-RA-100	9.4	7.5	15.9	61	62
Kd-PJ-100	9.6	7.6	16.3	62	62
Kd-PJ-400	10.5	10.1	23.5	74	74
Kd-PJ-800	16.5	15.3	27.3	90	91
Kd-Pro-100T	11.0	11.0	20.6	74	71
Kd-Pro-160	10.7	10.2	19.7	72	71

Table 3 The granularities, σ_{per} and observing result of testing samples

Sample numbers	σ_r	σ_g	σ_b	$\sigma_{\text{per}}(12\times)$	Observed result
T-1	15.1	13.3	24.1	84	
T-2	11.5	12.2	16.5	75	Much better than T-1
T-3	15.1	14.5	21.6	85	Similar to T-1
T-4	14.3	17.1	23.7	90	Worst
T-5	12.5	12.5	20.0	78	Better than T-1, and worse than T-2
T-6	12.6	16.5	23.1	89	Similar to T-4

数据与印片观察效果有较好的一致性,表明选择了比较合适的有表征性、最具表现力的测试密度点。

3 印片颗粒指数测定值的影响因素及测试修正

印片颗粒指数方法中规定了一些标准的传递因素,红、绿、蓝三色 $\gamma a(E_{\text{CP}})$ 相等为其中之一。因为 $\gamma a(E_{\text{CP}})$ 代表的是彩色相纸放大扩印时的实际反差系

数,实际的三色反差系数相同是印制成密度不同的灰色调的设计要求。但实际的彩色负片、彩纸组合扩印体系与理想情况存在偏离。因彩纸的三色感光测定 γ 值基本相同,这一偏离主要表现为不同的三色 $a(E_{\text{CP}})$ 值。

3.1 参量 a 的意义和测定

参量 a 的引入,与彩纸的 γ 相关。 γ 是由常规感光测定方法确定的特性曲线反差系数^[2],即彩纸对参考灰光楔曝光,并冲洗加工平衡至中灰时特性曲线线性部位的斜率。

实际应用中,对彩纸起光调制作用的不是参考灰光楔,而是彩色负片。彩色材料的染料光谱性能与灰光楔的光谱性能存在着差异,造成彩纸实际应用的特性曲线与感光测定的不相重合。如图 4 所示,实线和虚线分别为感光测定和实际应用(没有放大)时的彩纸特性曲线(某一单色)。从曲线看,两种情况都产生彩纸上 D_{A1} 的密度时所对应的负片 M 状态密度不同,灰光楔时为 D_{M0} ,彩色负片时为 D_{M1} ,形成两曲线不同的反差系数,分别为 γ 和 γ' 。引入系数 a ,使 γ 与 a 的乘积为 γ' ,则 a 的引入纠正了感光测定的 γ 值在实际应用中的偏差,得到了彩纸与彩色负片配合使用时的实际反差, a 的含义由此体现。 a 系数反映的是不同彩色负片与彩纸配合、没有放大时的具体情况,会随彩色负片、彩纸的不同组合而变化。

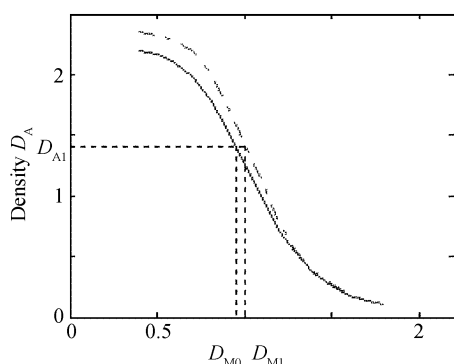


Fig. 4 The relation between the densities of color paper and color film

试验求取系数 a 的方法如下:将负片在日光下对灰光楔印制曝光(没有放大),冲洗加工制得负片光楔。将彩纸在能够模拟扩印机扩印条件(包括光源和红、绿、蓝滤色镜)的感光仪上对灰光楔和各负片光楔印制曝光(没有放大)。反复调整曝光条件,使冲洗加工后的各条彩纸光楔中等密度处平衡至中灰色。测定各负片光楔各级的 M 状态密度和相对应的彩纸光楔各级的 A 状态密度,分别以 M 状态密度和 A 状态密度为横坐标和纵坐标作图,可得到图 4 所示的三色特性曲线,求取三个单色密度均为 0.74 左右(18%灰)处曲线的反差系数。灰光楔情况时为 γ ,负片光楔情况时为 γ' , γ'/γ 即为所求的 a 值。

再选定四个不同的曝光时间,重复上述过程,每个负片共得到五个 a 值,取平均值为最终结果。

选用三种彩色负片分别与 Lucky SA-2 型彩色相纸组合,测定的 a 系数值见表 4。

Table 4 Measured a values

Film numbers	In grey density case		
	S-1	S-2	S-3
a_r	1.10	1.05	1.04
a_g	1.04	1.01	1.06
a_b	0.96	0.95	0.96

数据表明,所实验负片之间存在着 a 的差异。三种负片共同的特征是 $a_r > a_g > 1, a_b < 1$,说明就与这三种负片的配合使用而言,Lucky SA-2 型彩纸实际使用的红、绿色(对应 a_r 和 a_g)反差系数比常规测定的为大,而蓝色(对应 a_b)反差系数却比常规测定的小,不同的负片这种大、小的程度不同。

3.2 参量覆盖力的意义和测定

覆盖力系数 E_{CP} 的引入基于彩色材料中这样的实际情况:由仪器测定的宏观密度不仅依赖于染料的浓度,而且还依赖于影像的微观结构^[5]。由一个小于 1 的系数来表示这种密度对染料微观结构的依赖程度,叫作覆盖力系数(CPE)。均匀的染料分布表现为最大的覆盖力值 1,从这个意义上讲,无结构的参考灰光楔就属于这种均匀分布情况。在彩色负片中以相互分离的染料云形式非均匀分布情况下,则表现为一个低于 1 的覆盖力值,特别是在染料云没有显著重叠的低密度和中等密度区。实验表明,覆盖力的数值随密度的不同、扩印时放大倍数的不同而变化,随负片种类的不同而变化。Toper 的试验^[6]给出,放大倍数小于 7 倍时,覆盖力值没有变化为 1;放大倍数再增高,覆盖力值逐渐降低,到 11.6 倍时,可降至 0.9 左右。

覆盖力的实验求取方法如下:将负片在日光下对灰光楔曝光,冲洗加工制得负片光楔。将彩纸在能够模拟扩印机扩印条件(包括光源和红、绿、蓝滤色镜)的放大机上选择较小(如 5 倍以下)和需测量的放大倍数(7 倍以上)对各负片光楔条曝光,使冲洗加工后的各彩纸光楔中等密度处平衡至中灰色。测定各负片光楔条各级的 M 状态密度和相对应的彩纸光楔各级的 A 状态密度,可得到不同放大倍数下彩纸的三色特性曲线。

以低于 5 倍的情况视为覆盖力为 1 的情况,与任一负片密度相对应的彩纸密度为 D_s ,同一负片密度下高放大倍数的彩纸密度为 D_L ,则应有如下关系^[3]:

$$D_L = E_{CP} \times D_s + C, \quad (3)$$

所有的负片密度级均可组成(3)式,可得方程组,再

用最小二乘法拟合求得覆盖力值。

采用上述方法,本试验中以 4.5 倍作为覆盖力为 1 的情况,求取了三种负片组合 Lucky SA-2 型彩纸放大 8 倍和 12 倍的覆盖力值。结果见表 5。

Table 5 The E_{CP} values at two magnified times

Sample numbers	S-1		S-2		S-3	
	8×	12×	8×	12×	8×	12×
Red/Deviation($\times 10^{-4}$)	0.95/0.5	0.91/1.2	0.92/1.5	0.89/1.2	0.95/0.9	0.91/0.9
Green/Deviation($\times 10^{-4}$)	1.00/0.9	0.95/1.5	0.96/0.2	0.91/1.0	0.97/0.2	0.95/0.3
Blue/Deviation($\times 10^{-4}$)	0.99/0.7	0.98/1.5	0.90/1.3	0.86/3.4	0.93/2.6	0.93/1.3

Table 6 The $a(E_{CP})$ values at 12× of some films

Sample numbers	Red	Green	Blue
S-1	1.00	0.99	0.94
S-2	0.93	0.92	0.82
S-3	0.94	1.00	0.90

印片颗粒指数方法中要求彩色相纸在中灰密度时有基本相同的三色反差系数,表 6 中三色 $a(E_{CP})$ 的不同则表明实际情况与印片颗粒指数方法的要求存在偏离。比较而言,S-1 样片较接近要求条件,S-2 和 S-3 样品则偏离较大。

3.3 测试修正

表 6 所示 3 个样品中,S-1 为柯达 ISO100 彩色负片,S-2、S-3 为实验样片。表 2 柯达负片印片颗粒指数数据表明,测试印片颗粒指数数值与柯达彩色负片有较好的吻合,即较符合 S-1 样品情况。考虑到蓝光通道颗粒度的权重很小,可认为 S-1 样品三色 $a(E_{CP})$ 值近似有相同的数值 1,符合印片颗粒指数方法的要求。S-2、S-3 样品情况,三色 $a(E_{CP})$ 值偏离较大,需根据(1)式进行分析和修正。

由(1)式和 $k=105$,只考虑 $a(E_{CP})$ 引起的偏差时,有

$$\Delta\sigma_{per} \leq \Delta\{105 \times \lg[a(E_{CP})]_{max}\} = 105 \times 0.434 \times \Delta[a(E_{CP})]_{max}/a(E_{CP}), \quad (4)$$

S-2 的情况,若以最大权重的绿色成分估计 $[a(E_{CP})]_{max}$,则 $[a(E_{CP})]_{max}=0.08$: $\Delta\sigma_{per} \leq 105 \times 0.434 \times 0.08 = 3.7$ 个印片颗粒指数单位。

S-3 的情况,主要考虑红色的 $a(E_{CP})$ 偏差 0.06,所占权重 $\leq 1/3$,可估计: $\Delta\sigma_{per} \leq 105 \times 0.434 \times 0.06 \times 1/3 \approx 1$ 个印片颗粒指数单位。

若红色和绿色都有近 0.05 的 $a(E_{CP})$ 偏差,则 $\Delta\sigma_{per} \leq 105 \times 0.434 \times 0.05 = 2.3$ 个印片颗粒指数单位。

2 个印片颗粒指数单位的差别,意味着 50% 的观察者能看出印片颗粒性的不同;4 个印片颗粒指

实验数据拟合偏差很小,覆盖力值的统一性较好。数据表明覆盖力值随着放大倍数的增加而减小。

由表 4 和表 5 所示实验结果,可得到放大 12 倍时 $a(E_{CP})$ 的数值,见表 6。

数单位的差别,则意味着 90% 的观察者能看出印片颗粒性的不同。由此可见,当测试样片的三色 $a(E_{CP})$ 值,主要是红、绿两色与 1 有 0.05 左右的偏离时,测试 σ_{per} 值会有 2 个单位的偏差,测试值应减去 2;而当测试样片的 $a(E_{CP})$ 值,红、绿两色与 1 有 0.08 左右的偏离时,测试 σ_{per} 值应减去 4。4 个印片颗粒指数单位的偏差,是一个级别的差距,其修正不可忽略。

4 其他放大倍数的情况下的印片颗粒指数测定

原则上印片颗粒指数方法不只限于负片放大扩印 12 倍的情况,其它的放大倍数同样有印片颗粒指数的概念。理论指出,负片颗粒度的测量孔径 d (μm) 与其结果表征情况的放大倍数 M 有下述关系:

$$d \times M = 575, \quad (5)$$

$M=12$ 时, $d=48 \mu\text{m}$ ^[7],其它放大倍数的 σ_{per} 值,需按(5)式相应地改变测试孔径 d 。

需指出,负片的颗粒度随测试孔径的变化关系受许多因素的影响,特别是染料云的形状^[8],一般情况下,没有统一的变化规律。但对于感光染料采用各方面完全相同工艺技术的同一类负片,其颗粒度与测试孔径有较固定的关系, σ_{per} 值与放大倍数间有较好变化统一性^[9]。

结论 彩色负片印片颗粒指数表征的是一定扩印系统条件下中等灰色调印片的颗粒效果,实际应用中,应根据不同的负片特性选择不同的密度级测定;不同的负片、正片的组合特性影响测试准确性,特别表现为代表彩色正片感光特性曲线反差系数在实用中变化的 $a(E_{CP})$ 数值引起的修正。对实际样片 $a(E_{CP})$ 值的测定表明,红、绿主要两色值与 1 有 0.05

的偏离,产生 σ_{per} 值 2 个单位的误差,0.08 的偏离则产生 4 个单位的误差,在实际测试中,应根据 $a(E_{\text{CP}}$ 的数值特性给予修正。

参 考 文 献

- 1 Xu Yanfang, Liu Wenyao, Tang Zhijian. Study of the color film graininess—print grain index. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2004, **24**(1):125~130 (in Chinese)
- 2 Mess C E K, James T H. *The Theory of the Photographic Process* (照相过程理论). Tao Hong Transl. Volume 1, Beijing: Science Press, 1985, Chap. 4: 93~110 (in Chinese)
- 3 Zwick D M. Film graininess and density—a critical relationship. *Photogr. Sci. Engng.*, 1972, **16**(5):345~348
- 4 Topfer K, Jacobson R E. The relationship between objective and subjective image quality quality criteria. *J. Inf. Rec. Mats.*, 1993, **21**(1):5~27
- 5 Saunders A E. Relationship between spectral bandwidth and image structure for dye images. *J. Photogr. Sci.*, 1992, **40**(4):110~117
- 6 Topfer K. Experimental investigation of the noise transfer from silver halide negative films to print materials. *J. Photogr. Sci.*, 1993, **41**(4):137~142
- 7 Jones R C. New method of describing and measuring the granularity of photographic materials. *J. Opt. Soc. Am.*, 1955, **45**(10):799~808
- 8 Jarvis J R. The relationship between coupling kinetics and the noise properties of color negative films. *J. Photogr. Sci.*, 1993, **41**(5):167~171
- 9 Property of Kodak color films. *Photographer*, 1999, **1562**:50 (in French)

告《光学学报》投稿者

今年以来,《光学学报》来稿量翻番,而发表容量基本不变,造成《光学学报》的发表周期过长。为了尽快缩短发表周期,提升《光学学报》的学术质量,从现在开始,大幅度提高录用水准,把《光学学报》办成刊登优质学术论文的品牌期刊。

录用的具体要求如下:

- 1) 创新性明显: 物理思想新或所用方法新,结果新;
- 2) 可信性强: 研究背景交代清楚,引用相应文献完整;
- 3) 实验数据丰富完整,详实可靠;理论分析参量、假设条件已清楚列出;
- 4) 理论分析详尽,深入透彻;并曾从多方面加以考虑、验证过;研究内容足以证明结论;
- 5) 研究结果具有足够的学术价值和普遍意义,在本分支学科或光学领域将会有一定影响;
- 6) 论文撰写条理清楚,重点突出,语言简洁,篇幅适中,摘要、关键词、字符、公式书写、图表、参考文献等均符合《光学学报》征稿简则中所载明的 10 项要求。

《光学学报》编辑部
2003 年 11 月 20 日