

彩色电视摄像机中棱镜分光膜的研制

王继武 曹 英 姜真子

一、摘 要

为了把通过摄影物镜所摄取到的光线在三色分光中得到充分的利用,在分光措施中,采用了多层介质膜,多层介质膜的制备是依据计算所得到的数据制成的分光膜,它可使一部分光按照所需的光谱透过率 $\tau(\lambda)$ 透过(或按反射率 $\rho(\lambda)$ 反射)其余的全反射(或透射)。

按这一原理采用四分之一和八分之一波长控制制备了分光棱镜分光膜。这种棱镜分光膜,当光倾斜入射时较好的减小了方向效应和偏光效应。为了解决上述二效应,我们在设计(或计算)多层介质膜系和选择材料上予以充分考虑。通过对膜系中的每层光学厚度的计算和修正来减小偏振效应,以及采用偏振效应较小的膜系,解决方向效应的办法是采用我所制备的颜色玻璃作为修饰滤光片,使之减小干涉效应(而它与入射光线进入膜层的光程有关)。从而使同一组光线以不同方向入射这一膜层时,使出现的颜色差别减少。

二、彩色电视摄像机的概况⁽¹⁾

彩色电视摄像机中,不仅对它的外部光学系统——摄像机物镜提出了很多要求,对于摄像机内部光学系统也提出了许多要求。举例:限制外形几何尺寸,克服鬼象及偏振光的影响,减小光线在分光面上的入射角,有良好的分光特性等,这些在彩色电视摄像

机中是特别重要的。

内部光学系统的作用是如何使从摄得的光学影像得到高效率 and 正确的三色光谱积分响应,以使有效的获得颜色复现的必须的三色度电信号值。

为了把通过摄像物镜所摄取的光线在三色分光中得到充分利用,再经过修饰滤光片的修饰,满足三色度值,经过色度学方面的理论计算配出理想电学矩阵使之达到三色电信号值传送出去。

棱镜分光系统如图 1

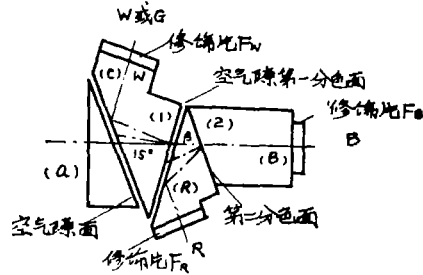


图 1 分色系统

棱镜的入射面(a)垂直于摄影物镜的光轴。入射光线经过棱镜面(a)后,在面(1)形成二向分光,其中W光反射之后,再到C面产生全发射,越出面W及修饰片 F_w 进入W摄像管。透射的光线包括红、兰两部分,再经过面(2)的二向分光膜,使兰光透过越出面B及修饰滤光片 F_b ,进入兰摄像管,反射部分在面(1)空气隙的第三块棱镜的表面上产生全反射,越出R及修饰滤光片 F_r ,进入红摄像管。

三、彩色电视摄像机中 棱镜分光膜的理论 设计（或计算）。

从颜色复现的要求，摄像系统应具备的分色特性重要是如何确定分色函数，使能对所摄影物上的每一象点得到正确的三色度值，再经电路上矩阵转换得出正确所需的三色度电量值，由此而来对分色的光谱特性应特别设计和计算而制成的。

由于棱镜分色都是由光学薄膜来实现的，而多层膜的滤色特性是靠光的干涉形成的，滤色的光谱响应是随光线的入射角和偏振状态改变的。所以我们在考虑光学薄膜的膜系过程中，光入射到膜层表面的角度大小

可引起分色效果的差异。

(1) W分光膜

分色次序是 W、R、B 采用先反 W 的分色膜，它本身通过计算技术进一步改进，减小了对偏振光和方向效应的灵敏性，以及合成光谱的一致性，不仅有利于 W 色信道，而且对 R 和 B 色信道也有好处。

将 W 分色膜以反射的方式分出来，从而使发生在反射和透射带之间的重叠区的诸效应，在正体效果上显著减小。以 W 分色膜理论数据作为光学薄膜计算的描准函数，通过计算机一系列运算找出两个膜系偏振效应，其较小膜系结构为 (1) $G(LQHQ)^5 A^{(1)}$ ，(2) $G(HQLQ)^5 A$ 这是四层膜组成的周期结构。该膜系先选定高、低折射率之后，运用公式⁽¹⁾

$$n_{Q1} = \sqrt{n_H n_L} \left\{ \frac{h_0 \sin \theta_2}{\sqrt{n_H n_L} \sqrt{(n_H^2 - n_0 \sin^2 \theta_0)(n_L^2 - n_0 \sin^2 \theta_0)(\sec^2 \theta_0 - \frac{n_0^2}{n_{m+1}} \tan^2 \theta_0)^{1/2k}}} \right\}$$

$$n_{Q2} = \sqrt{n_H n_L \left(\frac{n_{m+1}}{n_0} \right)^{1/2k}}$$

上述两个公式中 n_{m+1} 为玻璃 (k_9)， i 对于不同膜系有不同值，对膜系 $G(LQHQ)^5 A$ ，为 (-1)， $G(HQLQ)^5 A$ 为 (1)。k 为周期数。假若 $n_H = 2.0$ (ZnO_2) · $n_L = 1.46$ (SiO_2) 时代入公式，计算 n_{Q1} 、 n_{Q2} 得： $n_{Q1} = 1.63$ ， $n_{Q2} = 1.67$ ，在薄膜材料中与氧化铝 (Al_2O_3) 的折射率相似。将上面诸值代入膜系中运算其结果：如图 2、3 及表 1

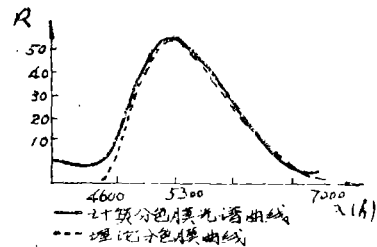


图 3 膜系 $G(LQHQ)^5 A$ 分色曲线

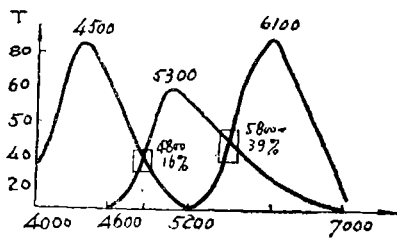


图 2 理论的分色棱镜光谱曲线

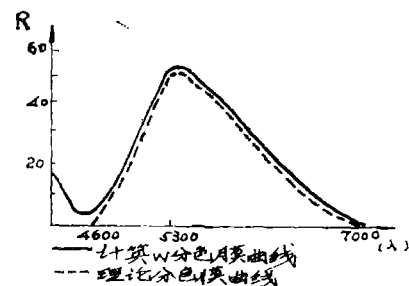


图 4 膜系 $G(QLQH)^5 A$ 分色曲线

表 1

	峰值 波长 (Å)	峰值 透过率 (%)	半宽度 (Å)
分色膜理论值	5,300	55—60	920
膜系 G(LQHQ) ⁵ A	5,300	64	1050
膜系 G(HQLQ) ⁵ A	5,300	60	960

(2) 反红透兰膜

在分色棱镜系统中第二个分色面，虽然只起红、兰分离作用，但由于偏振效应，不可避免的要有剩余反射和剩余透过出现，而且对于S、P分量这些剩余量也不一样。在干涉涂层中尽量减小偏振效应，我们采用的膜系具有两个作用，一个起着（红蓝隔作用），另一个是蓝路的截止区域，从而使达到理论值。所以要选择偏振效应尽量小或无偏振的膜系结构，如 $G(\frac{L}{2}H\frac{L}{2})^5A^{[2]}$ 型的对称膜系结构，在此膜系的基础上我们加以修饰并考虑接近玻璃的涂层有效指数具有小的偏振分离。此膜系展开为 $G\frac{L}{2}HLHLHLHL\frac{L}{2}A$ 。

在计算中接近玻璃的低折射率膜层 ($\frac{L}{2}$) 可以忽略。故此膜系为 $GH*L*HLHLHLH*0.5L*A$ ，其中具有*号为修正层其光学厚度为四分之一波长，计算结果如图 5 所示，只与理论二向分色膜在短波方面稍差一些，但得到蓝路的透过率很高在92%以上，且长波

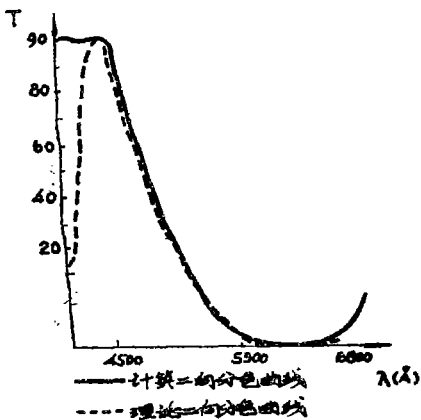


图 5 反红透蓝光谱曲线

区域的截止度近似理论二向分色膜光谱曲线。

四、棱镜分光膜的制备

(1) W分色膜及修饰滤光片

在膜系计算中我们选择两个膜系，第一个膜系为 G(LQHQ)⁵A。第二个膜系为 G(HQLQ)⁵A。上述二膜系的每层膜光学厚度为 $n_L d_L \cos \theta_2 = n_H d_H \cos \theta_H = n_Q d_Q \cos \theta_Q = \lambda_0/8$ 因为是八分之一的，故我们需要在现有的涂膜装置上改装解决控制方法如图 6 所示。经过改装后我们用等高线法，将控制片与被涂棱镜置于真空室内不同高度及角度（相对蒸发源而言）。控制中应严格的控制每层的精确光学厚度。特别是高折射率层 (n_H)，如果控制迟后或提前时，其峰值位置将是迟后或提前。对于低折射率和中间折射率材料膜层也不能忽略。它是起着反射峰值两侧。

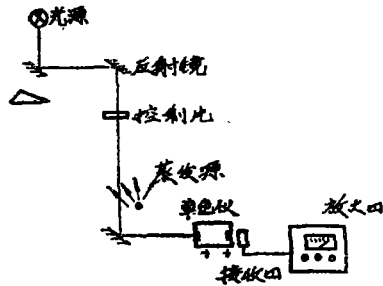


图 6 φ450mm 涂膜机改装光路图

透射区域平滑程度的作用。在工艺上注意第十九层略薄些为佳（大约为1/40）这样反W分色膜短波区域透射很平滑且透过率在90%左右。如图 7 所示。

第二个膜系制备时控制方法同上。仅在控制低折射率材料膜层时精度要高，尽量不要超过原计算光学厚度值，不然易产生短波区域的透较差，但它有一定优越性，如果作的很好时，将在 4200 之前反射率较高在 25% 左右，而 n_H 层仅是与反射带的宽度值及反射率的高度值有关。通过大量实验这种

膜系在长波区域与理论分色膜曲线相近似，其结果如表 2 及图 8 所示：

套棱镜中没有发现失效及膜层脱落现象，

(2) 反红透蓝膜^[2]：

所采用膜系为，GH*L*HLHL*HLH*0.5L*A，这个膜系中代有 * 号的为非四分之一波长的光学厚度，因为我们没有非四分之一控制设备，需要进行大量实验及总结经验，利用单色仪及控制表头变换来达到变换膜层非四分之一化，运用误差分析的方法验证非四分之一是否与计算相同、仅举几例说明每层光学厚度的影响，如图 9 所示。

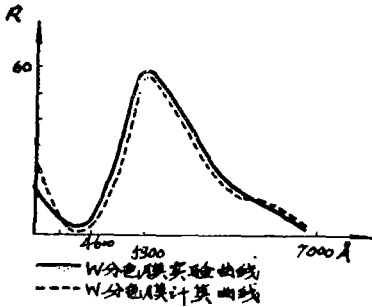


图 7 膜系为 G(HLQ)⁵A 的分色膜

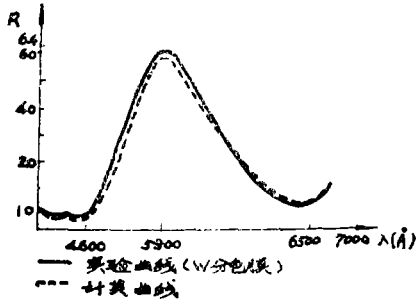


图 8 膜系为 G(LFHC)⁵A 分色膜

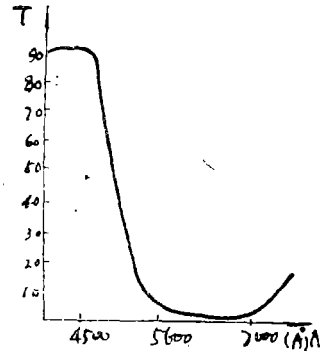


图 9 修正层的控制与计算结果一致时二向分色膜曲线

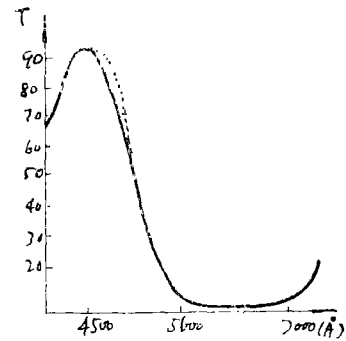


图 10 第九、十层修正误差超过时出现一部分缺少

	理论分色膜系			测量仪器 (苏)
	曲线值	计算值	实验值	
半宽度	920	980	940	GΦ—10
峰值位置	5,300~5,350	5,300	5,300	GΦ—10
峰值透过率 %	55~60	60	58	GΦ—10

上述两个膜系实验测得 S、P 偏振分量很小 (在 30° 之内)，如果超过 30° 时两个偏振分量分离程度有所增加。但增加并不很显著，且不能使分色膜的曲线变坏，仅因干涉膜本身有方向效应而峰值前移。解决偏振效应是涂膜工艺及理论计算的一个课题。如果理论计算不受四分之一波长约束时、工艺方面就需要解决非四分之一控制方法，才能满足彩色电视摄像棱镜分光膜的要求及赶超先进水平。

我们所作的 W 分色膜系采用高温氧化物材料，膜层牢固性好，通过近二年所作十几

图 9，实验中修正层控制精度与理论计算一致，所以透过区域曲线平滑，透过率很高，在 92% 以上。

图 10，如果其他修正层及非修正层控制精度与计算相等时，而第十、九层膜控制到误差超过允许时，曲线在透射区域右上方缺少一部分截止边缘变得很陡，峰值前移。

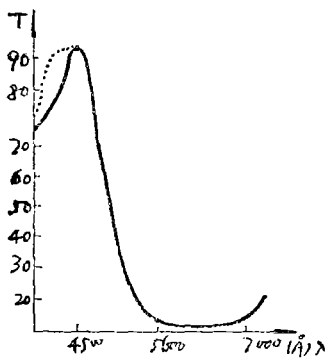


图11 第一、二层，误差过多时二向分色膜短波部分缺少

图11，其他层控制正确，而第一、二层过厚时，曲线短波区域缺少一部分，且峰值往后去，截止区域也变得很陡、

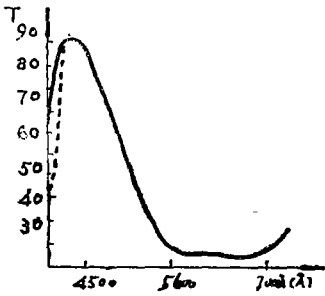


图12 其他修正层精确而第五层稍厚引起四线短波部分透射率下降

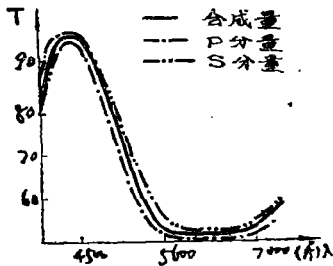


图13 光线 30° 入射时两个分量分离情况

图12示：如果其他修正量与计算相一致时第五层过厚或过薄则曲线短波部分透射区下降而变窄。对第五层不能超过误差允许值。如果修正适当时（图12）为较理想蓝、红分色膜。

光线 30° 入射时修正方式同上。我们所作的反红透蓝膜S、P分量透射区域平滑重

合。透射区域与截止交界部分的S、P分量仅有3%左右。截止部分越往下时，S、P分量由3%至5%最大到7%，反射区域S、P分量只有3%。

目前我们所作的反红透蓝膜的膜系中加上匹配层。并没有解决S、P分量偏振、仅是减小偏振分离程度。偏振分量如果稍大。影响二向分色膜交界点颜色的复现较差。如何解决偏振问题是研制分光棱镜的一个课题，有待今后解决。

关于吸收型修饰滤光片

采用吸收型滤光片($F_w F_B F_R$) 图14示三种颜色玻璃均是我所熔炼的。其透过率（比买品）较高，并对每种颜色玻璃在相应的主波长涂单层氟化镁增透。

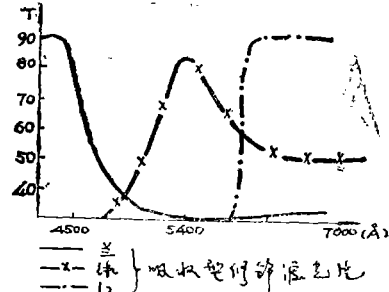


图 14

五分色棱镜组合测量结果（见附表1）

所作十几套棱镜蓝路透过率在80%左右，红路透过率在80~85%，W路透过率50~55%。交点、峰值位置、半宽度见表3和图15

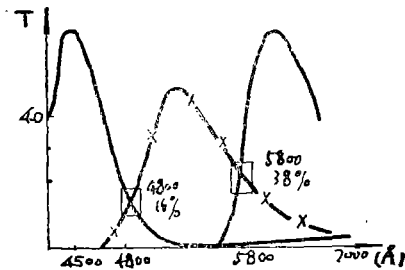


图15 棱镜组合测量数据

表 3

		峰值波长 (Å)	峰值透过率 T%	半宽度 (Å)	交点波长 Å	交点透过率 %
红	路	6,200~6,300	80~85	810		
W	路	5,300~5,350	50~55	940	5,780	38
蓝	路	4,400~4,500	80~82	560	4,850	16

表 4 加矩阵后颜色复现颜度差

色 标	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	女肤 子色	白肤 种人色	黄肤 种人色	黑肤 种人色	学兰 生布	红旗 绸	玉米 叶	靠确 的良	桃油 红墨	黄星 五绸	稻 叶	黄米 玉穗	稻 穗	正兰 布	浅茄 子	虚 色
颜 度 差	0.6	0.4	0.05	0.008	1.0	0.8	0.47	2.1	0.8	0.05	2.05	1.75	0.8	0.70	2.0	3.05

从表 4 加矩阵后颜色复现情况看在允许色差 3 jnd 内, 只有 16 色虚拟色稍接近允许值。

加矩阵元为 (仅举二例)

$$\begin{pmatrix} R_{出} \\ G_{出} \\ B_{出} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.351 & -0.548 & 0.097 \\ -0.106 & 1.219 & -0.214 \\ 0.001 & -0.140 & 1.138 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{入} \\ W_{入} \\ B_{入} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} R_{出} \\ G_{出} \\ B_{出} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.457 & -0.578 & 0.161 \\ -0.112 & 1.250 & -0.138 \\ -0.009 & -0.173 & 1.182 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{入} \\ W_{入} \\ B_{入} \end{pmatrix}$$

从加矩阵元而对角线接近 1、为理想值 (11、22、33) 但若为理想的分色膜是达不到。

六、棱镜分光膜综合结果分析

组合棱镜与镜头相匹配后, 首先评价颜色复现情况如何? 我们所作的棱镜峰值透过率。峰值位置、半宽度、交点等基本上接近设计指标。加矩阵之后, 据拟定的 16 色, 只有第 16 号色 (虚拟色) 稍差之外, 其颜色误差平均值为 1.64 jnd。

蓝路分色曲线的构成, 是由 W 分色膜与反红透蓝膜合成的蓝路短波长的截止区域。

W 分色膜的透过区域直接影响蓝、红路光谱、W 分色膜的短波长有一反射稍高的反射值, 使蓝路波长 4,000~4,200 处下降。与理论值稍差但对蓝路有益处, 这样组合曲线并不是一个分色膜就能独立构成的, 而是组合构成的。

红路的长波区域截止是利用反红透蓝膜及 W 分色膜长波区域比理论值稍高, 这样构成红路长波区域下降的另一个边缘。红路分色曲线是利用吸收型的颜色玻璃的前截止部分构成。

在分色膜及修饰滤光片上, 我们少用多层介质膜而采用吸收型的修饰滤光片, 这样分色膜光谱合成是由相互搭配构成使分色膜光谱分布的不平滑部分就少了。同时蓝、红路透过率也就提高了。而使两个不同方向的偏振光经倾斜膜层或吸收型颜色玻璃时出现颜色差异就减小。

多层介质膜倾斜使用时, 减小偏振效应在彩色电视棱镜分光中需要很好解决, 不然会出现颜色复现误差很大。

七、结 束 语

我们在所党委及党支部的领导下，以阶级斗争为纲，抓革命、促生产、取得一点成绩，但也存在不足之处。我们准备在1977年

研制中继续解决偏振效应问题，使之达到先进水平。

在我们作彩色电视棱镜分光膜时，长春光机学院应届毕业生江友君同学给予大力支持、对此我们致以谢意。

附表 1

波 长	理论计算分色曲线			实验制备的分色曲线		
4,000	9.27			4,000		
100	21.87			57.5		
200	49.20			68.5		
300	72.80			75.5		
400	84.44			80.0		
450				81.0		
500	77.77	1.12		77.5		
600	60.96	1.19		65.5	2.0	
700	40.25	6.64		39.5	8.0	
800	23.28	12.50		22.5	12.5	
900	11.22	17.34		10.0	37.0	
5,000	6.28	25.42		5.50	45.5	
100	3.58	36.48		3.0	52.0	
200	1.46	46.72		1.0	56.5	
300	0.47	55.00	0.71	0.5	53.6	
400		51.95	5.07		50.0	1.5
500		48.43	11.88		445	3.5
600		41.71	31.44		37.0	15.5
700		32.92	45.45		30.0	45.5
800		26.55	62.20		27.5	61.5
900		18.02	68.04		17.5	72.5
6,000		11.38	74.89		12.5	83.5
100		8.32	82.21		9.5	85.5
200		5.41	80.48		5.0	84.0
300		3.45	64.57		4.0	80.0
400		2.21	52.28		2.5	74.5
500		1.25	39.74		1.5	70.5
600		0.70	30.64		0.4	62.5
700		0.36	21.43		0.7	52.5
800		0.18	14.83		0.8	35.0
900		0.07	8.86		1.0	
7,000		0.03	10.01			

参 考 文 献

p 866

(3) 光学薄膜技术 周百林 尹树百 译

(4) 彩色电视中的色度学问题

王大衍 著

(1) Оптика и спектроскопия

том 33 выл 2 p332—338 1971

(2) Appl. Opt Vol 9, 1—4, 1970

(上接第10页)

王希泉同志参加本文的一些计算工作，他的仔细计算结果，四层增透膜还更加宽20~30 Å左右。

参 考 文 献

(1) K.Rabinovitch and A.Pagis, Appl. Opt. 14 (1975) 1326—1334

(2) Davidon, W.C., AEC Research and Development Report, ANL-5990(Rev)(1959)

(3) Fletcher, R., and Powell, M. J.D., Comput. J. 6 (1963)163—168

(4) Wells, M., CACM 8 (1965) 169—170

(5) Broyden, C.G., J.Inst, Maths. Applics 6 (1970), 76—90, 222—231.

(6) Fletcher, R., Comput. J. 13 (1970) 317—322

(7) Shanno. D. F., Maths. Comput. 24 (1970) 647—656

(8) 朱凤石赵瑞安, 计算机应用与应用数学1975年第9期1—16页

(9) 沈字 619 部队: 变尺度法膜系自动设计, 光学薄膜技术, 第五机械工业部综合研究所资料汇编 (1975年) 279 页

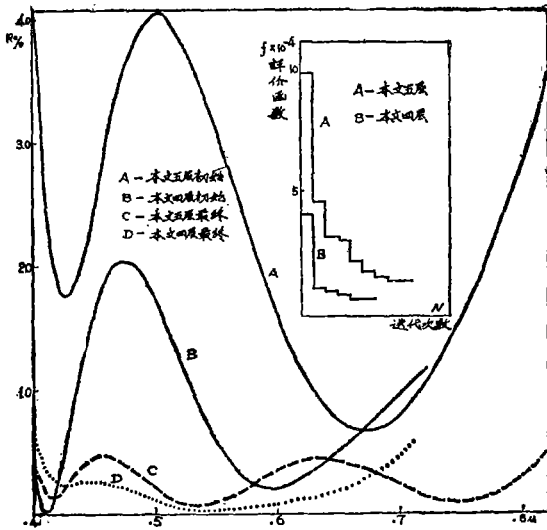


图 2 本文初始与最终的剩余反射率比较