

# 复合全息透镜用作单色器

姜亚光 黄佩倩

(苏州大学激光研究室)

曹 国 荣

(镇江师范专科学校物理系)

## 提 要

本文提出了用一个双复合重铬酸明胶全息透镜作单色器,计算并测量了此全息透镜的光谱半宽度,实验结果表明此新型单色器的可行性。

关键词: 全息透镜; 滤色片; 单色器。

## 一、引 言

全息光学元件在我国已开发了很广泛的应用,用全息平面光栅或全息凹面光栅可制成各种光谱仪或单色器<sup>[1,2]</sup>;用单片重铬酸明胶全息透镜可以把信息处理系统简化,成功地用于图像彩色化显示系统中<sup>[3]</sup>。本文旨在开发复合全息透镜的应用,利用复合全息透镜的色散与聚焦功能装备成一个小单色器,发现该仪器有独特的功能。由于单色器的用途不同,有的要求高分辨率、低杂散光;有的对分辨率要求较低,却希望输出光强较强。本文提到的单色器属后一种用途,它的特征是在仪器中免除了使用成像狭缝。众所周知,在单色器中都要用到入射狭缝和出射狭缝,或者相当狭缝功能的孔径光阑。一般地说,发光物体先要通过照明系统把入射狭缝照亮,入射狭缝接纳照明光斑中的一小部分能量进入仪器,即使仪器的衍射效率或透过率很高,从出射狭缝输出的光能量仍然不太高。因为光源发出的光能量已经大部分在入射狭缝处被阻挡了。这使人们想到,要使发光物体中发出的各种单色光更多地利用起来,最好不使用入射狭缝。其次,传统的单色器出射处所获得的单色像并不是光源的单色像,而是入射狭缝的单色像。因此,用传统的单色器无法知道发光物体的原始形状,因为狭缝处受到了光源的非相干照明。如果科研上或者艺术表演上有某种要求,希望将白光物体连续地分解为各种单色的物像,那么这个小单色器将是最合适的工具。这种新型单色器从原理上与其它单色器的区别,在于它不是空域“滤波”(加狭缝),而是频域滤波的。

## 二、复合全息透镜的制作与再现

拍摄全息透镜的记录介质采用 Kodak 649-F 干板经去银敏化后成为重铬酸明胶板,用氩离子激光 4880 Å 谱线作为记录光源,为使光路简单而易于调节,我们选用如图 1 所示的

收稿日期: 1986年1月29日; 收到修改稿日期: 1986年5月19日

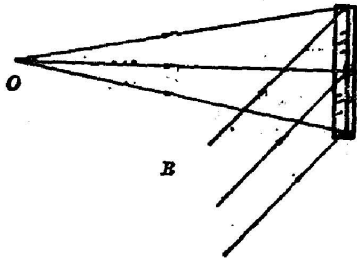


Fig. 1 The optical setup for recording the holographic lens

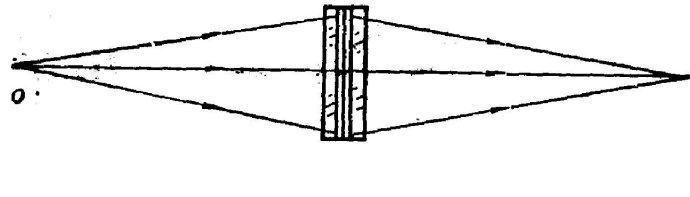


Fig. 2 The imaging system of the compound holographic lens

光路<sup>[10]</sup>。一束发散光垂直投射于全息干板的背面,另一束平行光以 $45^\circ$ 角斜射于干板,发射光中心点离底片 $300\text{ mm}$ ,全息干板的曝光孔径为 $30\text{ mm}$ 。按上述相同条件拍摄两片,取得高衍射率的单片全息透镜后,令其乳胶面对乳胶面合拢,且注意到斜射光方向对准,作永久性封合,即成为一片胶合全息透镜。

全息透镜的成像光路如图2所示。轴上距胶片 $300\text{ mm}$ 处物点 $O$ 发出的光经第一片全息透镜的衍射光为 $45^\circ$ 上斜射的平行光,当这束光照射到第二片全息透镜上时,衍射光就会聚到 $I$ 点即像点。所以,该全息透镜的焦距是 $150\text{ mm}$ 。以上分析仅对再现光波长 $\lambda_0$ 等于记录波长 $\lambda_0$ 时才有效。对任意再现光波长 $\lambda_0$ ,及照明光位置 $O$ ,成像的公式为

$$\frac{1}{f} = \frac{m\lambda_0}{\lambda_0} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \quad (1)$$

式中 $m$ 为衍射级, $r_1, r_2$ 分别为复合全息透镜到物点 $O$ 与像点 $I$ 的距离。

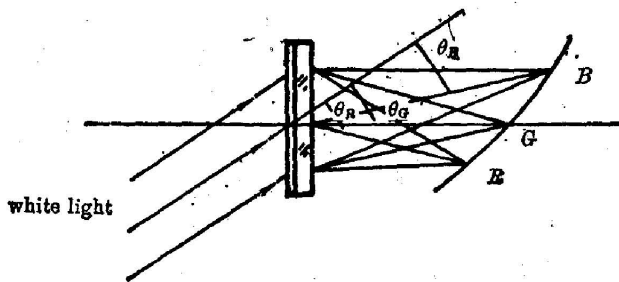


Fig. 3 White light illuminates a single holographic lens, the curved focal line is produced

一侧斜射单片全息透镜时,因为全息透镜有横向色散与纵向色散,聚焦点按波长不同散开成一条抛物线的彩带,如图3所示。红光偏转角 $\theta_R$ 最大,焦点 $f_R$ 也最短; $4880\text{ \AA}$ 的绿光仍在垂直方向 $\theta_G=45^\circ$ , $f_G=300\text{ mm}$ ,而蓝光偏转角 $\theta_B$ 最小, $f_B$ 也最长。

现在倒过来考虑,如果我们改用红光作照明光,只需把全息片转过一个角度,并把照明光源距离底片移远些, $f_R < f_G$ ,则在相应的后焦点 $f_R$ 处就会出现清晰明亮的像。或者虽然物距不变,只要像距符合公式(1)也可以,如图4所示。

当再现波长 $\lambda_0$ 变化后,经第一片的衍射光不再是 $45^\circ$ 上斜射的平行光,此光经第二片全息透镜衍射后不能在 $I$ 点成像,而且衍射方向不在布拉格条件所要求的角度,衍射光强会减弱。但是可以找到一个条件,对 $\lambda_0$ 也能有会聚点 $I_0$ 。我们以启发性的解释先给予初步概念。当白色的平行光以 $45^\circ$ 角自乳胶面

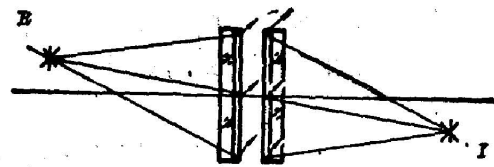


Fig. 4 Red source illuminates the compound holographic lens, rotating optical axis refocus the image  $I$

前人对于全息透镜的计算方法已作过详细探讨<sup>[4~6]</sup>, 本文就具体的一块复合全息透镜计算其滤波半宽度, 并且用测试单色仪的一套设备测试了滤光半宽度, 测试结果与理论计算符合良好。

### 三、光谱半宽度的计算与测量

计算复合全息透镜的光谱半宽度需要用到体全息的弱理论, 国内有关光全息学的教材中<sup>[7,8]</sup>, 通常介绍了体全息的强理论(耦合波理论)。我们选用弱理论的理由是因为弱理论简单易使用, 而且给出较多的信息、精度能满足要求。弱理论比强理论作了两点简化: 1. 入射光经衍射后能量的衰减假定可以忽略不计; 2. 衍射光在介质中继续产生次级衍射光, 忽略不计次级衍射光就使计算简单得多。利用费涅耳-克希霍夫衍射理论推导出简单的积分结果<sup>[9]\*</sup>。

设一片记录介质的厚度为  $L$ , 一个方向宽为  $M$  的孔径全息图, (见图5), 记录全息图时的物波与参考波以及再现全息图时的再现波与成像波单元矢量表达如下:

物波:

$$U_p = \exp \left[ j \frac{2\pi}{\lambda_1} (Z \cos \theta_p + x \sin \theta_p) \right],$$

参考波:

$$U_o = \exp \left[ j \frac{2\pi}{\lambda_1} (Z \cos \theta_o + x \sin \theta_o) \right],$$

再现波:

$$U_r = \exp \left[ j \frac{2\pi}{\lambda_2} (Z \cos \theta_r + x \sin \theta_r) \right],$$

成像波:

$$U_i = \exp \left[ j \frac{2\pi}{\lambda_2} (Z \cos \theta_i + x \sin \theta_i) \right].$$

在图5的  $x, y, z$  三个方向中仅考虑  $x, z$  二维,  $y$  方向与  $x$  方向同样推理。  $\theta_p, \theta_o, \theta_r, \theta_i$

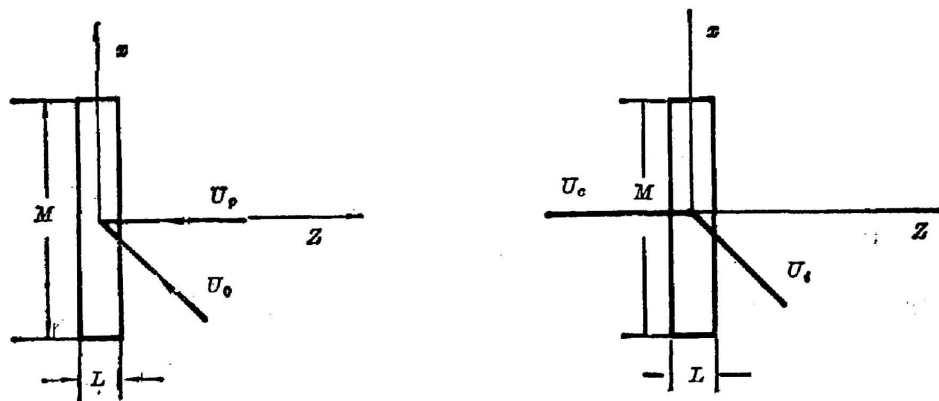


Fig. 5 Illumination of a cording and reconstructing the thick hologram

\* 本文的推导与参考[9]略有不同, 读者如需要可向作者索取资料。

是各波矢量与  $Z$  轴的夹角。把记录过程与再现过程合在一起,得成像波  $U_i$  为

$$U_i = Q \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda_2} r_s\right) \int_{-1/2}^{1/2} \exp(j\alpha Z) dZ \int_{-M/2}^{M/2} \exp(j\beta x) dx, \quad (3)$$

式中  $Q$  为常数,  $r_s$  为像点的位置矢量, (即  $r_s = Z \cos \theta_i + x \sin \theta_i$ )  $\alpha, \beta$  是与四个波矢量有关的复合矢量

$$\alpha = \mp \frac{2\pi}{\lambda_1} \cos \theta_0 \pm \frac{2\pi}{\lambda_1} \cos \theta_p + \frac{2\pi}{\lambda_2} \cos \theta_o - \frac{2\pi}{\lambda_2} \cos \theta_i, \quad (4)$$

$$\beta = \mp \frac{2\pi}{\lambda_1} \sin \theta_0 \pm \frac{2\pi}{\lambda_1} \sin \theta_p + \frac{2\pi}{\lambda_2} \sin \theta_o - \frac{2\pi}{\lambda_2} \sin \theta_i. \quad (5)$$

(3)的积分结果为

$$U_i = K \sin C \frac{L\alpha}{2\pi} \sin C \frac{M\beta}{2\pi}. \quad (6)$$

乳胶层的厚度  $L$  比全息元件的孔径  $M$  要小得多,所以  $\sin C \frac{L\alpha}{2\pi}$  要比  $\sin C \frac{M\beta}{2\pi}$  的变化缓慢得多,所以前一个函数可以看作后一个振荡函数的振幅包迹曲线。当  $L=0, M=0$  时  $U_i$  达到最大,此时称为布喇格条件得到满足。四个光波矢量的合成为零。如若因为再现光角度的偏折、或者波长的改变而使成像光变成零, (熄灭)。此时的临界角变化量与波长变化量称为灵敏度。在计算光谱半宽度时要对波长每变化  $\Delta\lambda = 20 \text{ \AA}$ , 求得一个衍射光振幅值  $u_i$ , 但是全息透镜面积上各处的拍摄条件是不一样的, 所以还要把各小面元上算得的衍射光振幅值求合成, 在直径为 30mm 的全息透镜上, 每 5mm 间隔取一点, 经过初步计算, 得到相对振幅随波长变化  $\Delta\lambda$  的关系的数值表(见表 1), 按表画出曲线, 求得半宽度值  $235 \text{ \AA}$ 。对于此全息元件的参数是拍摄波长  $4880 \text{ \AA}$ ; 乳胶厚度  $15 \mu\text{m}$ 。(Kodak 649F 原来厚度  $15.5 \mu\text{m}$ , 经过去银盐程序后估计略有变薄趋势, 未测量)。

在本研究室的测单色器半宽度的装置上测得光谱半宽度的实验值。图 6 画出了测试装置简图。  $L$  是白炽灯(近似点光源)。  $P$  是开小孔的屏(光阑),  $H$  是复合全息透镜,  $L$  经  $H$

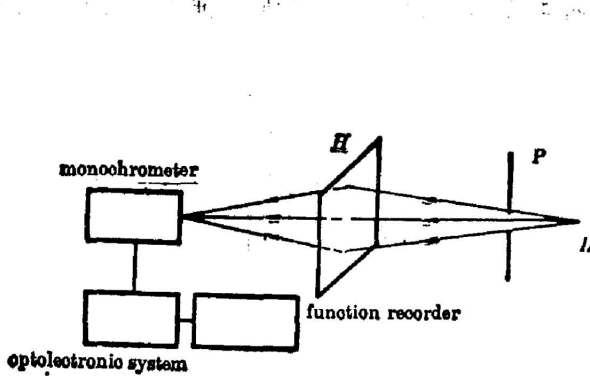


Fig. 6 Setup for measuring the half width of light intensity

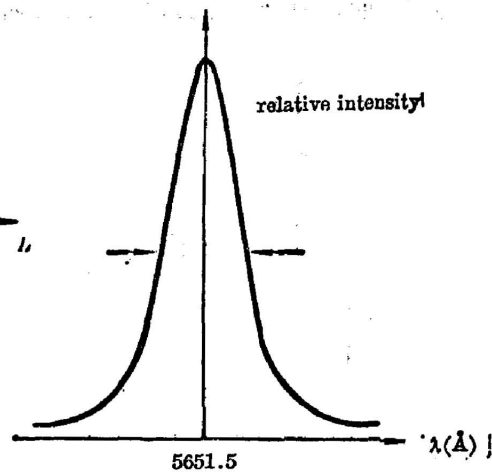


Fig 7. Spectrum curve of the image which is formed by a compound holographic lens, illuminated by an incandescent lamp

成像在单色器的狭缝处。调节  $H$  的偏折使某种颜色成清晰的像,用单色器扫描记录下一条像的光谱曲线如图 7 所示。图中中心波长是  $5651.5 \text{ \AA}$ , 光强半值的带宽约为  $245 \text{ \AA}$ , 和理论计算基本符合。

#### 四、新型单色器的可行性及优缺点

按图 8 的布置把全息透镜装置成一个简单的单色器。物体是一个黑底白开孔的双螺旋线,用白光光源准直光后从背后照明此物体,经过全息透镜聚焦在像平面上。所用的光源是水银灯。图 9 中三张单色像照片是这样拍摄成的:绿色像是  $5461 \text{ \AA}$  的单色像,由于接近拍摄全息透镜时所用的激光波长  $4880 \text{ \AA}$ , 所以全息透镜偏转角  $\alpha$  不大,焦距  $f'$  与公式(1)计算出的  $f$  相接近,成像质量较好。另外两张照片是  $5791 \text{ \AA}$  及  $5770 \text{ \AA}$  一对黄色双线的单色像及  $4358 \text{ \AA}$  蓝色的像。前者使全息透镜偏角  $\alpha$  大些,而且焦距变短,后者使全息透镜偏角  $\alpha$  反向,焦距变长。根据成像公式来调节像距,以得到清晰的聚焦像。在图 8 中还可以看到,在全息透镜后焦面有一个频谱,用圆孔屏作滤波器可以使需要成像的单色光从孔中穿过,挡住不需要的色光,使成像更清晰。如果不用滤波孔,也能成单色像,但是其它的色光扩散成为背景,如果两种色光波长相差不多,则会干扰主要色光的成像,明显的是蓝紫色的双螺旋圈照片中,可以在  $4328 \text{ \AA}$  蓝像边缘套有  $4047 \text{ \AA}$  紫色的像。如果双螺旋线的线条更细一些,应该能分出两套单色像,因为他们相差  $281 \text{ \AA}$ , 是全息透镜分辨能力所能达到的。

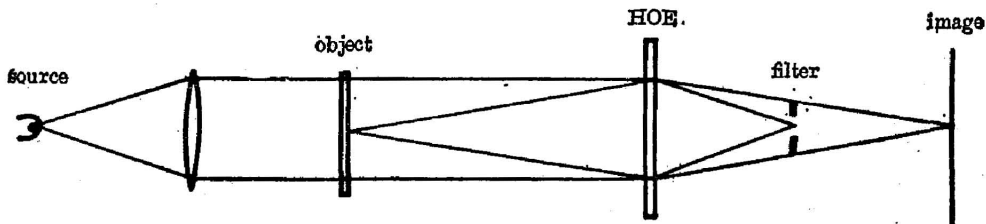


Fig. 8 Setup for formation of the monochromatic image by using the H. O. E.

上述三幅单色照片是放在实验桌上依次调好清晰的单色像而拍摄成的,要制作一个连续可调的单色器,则要求对于一定的波长  $\lambda_2$ , 全息透镜的倾角  $\alpha$  及焦距  $f'$  有如下关系。

根据公式(5),有

$$\lambda_2 = 0.488 \left( 1 - \frac{\sin \alpha}{\sin \theta_0} \right);$$

根据公式(1),有

$$f' = \frac{300 \times 0.488}{\lambda_2},$$

其中  $\theta_0$  是参考光角度,其中心值为  $45^\circ$ 。

根据上述两式可以描绘出单色器的轨迹。在我们的实验中令物与像的位置均不动,仅移动与转动全息透镜一个元件,因此黄、绿、蓝三个像的标度不同。同样,也可以调节全息透镜,使输出不同单色的平行光。总之,本实验证明在光学原理与实践方面是可行的,机械的轨迹也是明确的,剩下的是给出简单与方便的机械设计问题。

为讨论这种小单色器的应用价值,试举国际上两种小单色器作比较。

例 1. 凹面光栅小单色器 (美国 American Holographic 公司的 100 M 型, 1985 年)

光栅面积:  $37 \times 37 \text{ mm}$ 。光谱区  $2000 \text{ \AA} \rightarrow 10000 \text{ \AA}$ 。

分辨率: 对  $900 \text{ lines/mm}$  光栅, 当狭缝  $5 \mu\text{m}$  宽  $5 \text{ mm}$  高时, 分辨率为  $15 \text{ \AA}$ 。

透光能力: 未说明衍射效率, 仅标明杂散光为  $0.001\%$ 。

例 2. 干涉滤光片作单色器 (美国 Ealing 公司生产, 1985 年)

这是一片可变干涉滤光片, 滤光峰值随各点而渐变, 驱动滤光片在狭缝口扫过, 一定谱带宽度的单色光会渐次变换其峰值波长。

光谱范围:  $4000 \text{ \AA}$  至  $7000 \text{ \AA}$ 。

峰值透过率:  $45 \sim 50\%$ 。

全息透镜单色器与上述两种单色器相比

1. 衍射效率: 全息透镜单片衍射效率  $60\%$ , 复合片衍射效率为  $30\%$ 。在制作完善的条件下, 重铬酸明胶复合片可以达到  $60\%$  以上的稳定衍射效率 (注: 该全息透镜已存放近三年) 由于不加狭缝, 实际光能利用率更高。

2. 谱线半宽度: 计算值  $235 \text{ \AA}$ , 测量值  $245 \text{ \AA}$ 。半宽度与乳胶层厚度有关, 现在用的膜层厚  $15 \mu\text{m}$ , 如能加厚至  $35 \mu\text{m}$ , 则有希望进一步压缩半宽度至  $100 \text{ \AA}$ 。

3. 杂散光: 重铬酸明胶记录介质的杂散光水平优于光胶刻蚀及干涉滤光片的杂散光水平。

4. 像差: 追求亮度的单色器一般对像差要求很低, 但像差会降低单色性。在偏离布喇格条件下全息透镜的再现光偏轴角很大, 轴外像差增加, 所以所使用的光谱范围不能很宽, 例如从  $4000 \text{ \AA}$  到  $7000 \text{ \AA}$  左右。然而, 可以指出用拍摄光  $\lambda_1$  的倍数  $2\lambda_1, 3\lambda_1$  作再现光, 利用全息术的周期特点, 可以得到一些补偿。

综上所述, 用全息透镜作单色器其杂散光、分辨率、衍射效率都可以与传统的同等级单色器相媲美, 它的缺点是波段范围不能太宽、机械装架稍复杂。而它还有独特的优点是不用狭缝, 能量利用率高以及可以显示发光物体的原始形状, 这在艺术上将会有兴趣的, 它标帜了另一类别的单色器, 其实际用途尚待开发。

作者们感谢朱慧及章建民两位同志参加了全息透镜的拍摄, 胡祖元及沈磊两位同志参加了全息透镜的光谱半宽度测量实验, 拍摄了照片及绘制了插图。

### 参 考 文 献

- [1] 姜亚光, 宋从龙; 《物理》, 1979, 8, No. 1 (Jan), 62~65.
- [2] 姜亚光, 宋从龙; 《物理学报》, 1980, 29, No. 1 (Jan), 111~116.
- [3] Jiang Yaguang; *Applied Optics*, 1982, 21, No. 17 (Aug), 3138~3140.
- [4] J. N. Latta; *Applied Optics*, 1971, 10, No. 3 (Mar), 599~608.
- [5] J. N. Latta; *Applied Optics*, 1971, 10, No. 3 (Mar), 609~618.
- [6] J. N. Latta; *Applied Optics*, 1971, 10, No. 12 (Dec), 2698~2710.
- [7] Robert J. Collier; *Optical Holography*, (Academic Press, U. S. A. New York, 1971), 244~253.
- [8] 王永昭; 《光学全息》, (机械工业出版社, 北京, 1981年), 291~293.
- [9] 于美文等; 《光学全息及信息处理》, (国防工业出版社, 北京, 1984年), 146~149.

---

## **Compound holographic lenses used as a monochromator**

JIANG YAGUANG, CAO GUOGUANG\* AND HUANG PEIQING

*(Suzhou University, Laser Research Section)*

(Received 29 January 1986; revised 19 May 1986)

### **Abstract**

This paper presents a double compound dichromated gelatin holographic lenses used as a monochromator. The spectrum halfwidth of the holographic lenses was measured and calculated. The experimental results shown the feasibility of a new type of the monochromator.

**Key Words:** Holographic lens; Color filter; Monochrometer.

---

\* Physics Department, Zhen Jiang Teacher's College for Professional Training.