

制作和重现像面彩色全息图的新方法

朱佩平 陈建文 徐至展

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 本文提出像面彩色全息图的制作白光重现的新方法。根据 Kogelnik 关于体积全息图的耦合波理论, 记录时, 根据角度灵敏度的要求, 把三基色参考光束分别按照不同角度入射到全息干板上。用这种方法记录的彩色全息图, 当用与三基色参考光束的空间频率相同的三基色普通光束照射时, 将重现消除了串色干扰的原物体的三维彩色像。利用三个全息光栅从白光中选择出三个再现基色波段, 并对像面彩色全息图色散补偿, 这种白光重现方法没有色模糊。

关键词 彩色全息图, 串色像, 角灵敏度, 波长灵敏度, 体位相透射全息图

A new method of making and reconstructing image color hologram

ZHU Peiping, CHEN Jianwen, XU Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract This paper proposes the new method of making image color hologram and reconstructing this kind of color hologram with white — light. According to Kogelnik's coupled theory of thick hologram, the angular sensitivity of the volume phase hologram is very high, while its wavelength sensitivity is rather low. Making use of this, three primary color reference beams can project on the holographic plate along different orientations respectively in accordance with the requirement of the angular sensitivities. When the hologram taken by this method is illuminated by the three primary color general light beams whose spacial frequencies are equal to the three primary color reference beams respectively, the three — dimensional true color holographic image of the original object will be reconstructed with the cross — talk removed. Using three holographic gratings to select the three primary wave bands from white — light for reconstruction and compensating for the dispersion of the color hologram, this kind of white — light reconstruction method can obtain three — dimensional color image without color blur.

Key words color hologram, cross — talk, angular sensitivity, wavelength sensitivity, volume phase transmission hologram

1 引言

彩色全息术的目的是产生一个其色彩非常接近于白光(例如太阳光)照明的原始物体的三

维彩色像。实现这个目标的主要障碍之一是串色干扰。彩色全息图是由红、绿、蓝三基色参考光和三基色物光干涉记录而成。因为三基色激光之间互不相干,所以彩色全息图上记录的是三基色参考光和三基色物光各自的干涉条纹。经过冲洗处理后,记录在全息干板上的干涉条纹就形成了具有衍射功能的复杂光栅。也就是说,彩色全息图是红、绿、蓝三基色激光各自独立干涉形成的三套衍射光栅的重叠。当用和三基色参考光相同的三基色再现光照射彩色全息图时,如果红光干涉形成的光栅只衍射出物体的红色真像,绿光干涉形成的光栅和蓝光干涉形成的光栅分别只衍射出物体的绿色真像和蓝色真像,那么三个真像迭加在一起,就可形成和物体色彩相近的三维像。可事实上,红光干涉形成的光栅不但要衍射红光,给出物体的红色真像,而且会衍射绿光和蓝光,给出物体的绿色和蓝色的伪像。同理,绿光干涉形成的光栅和蓝光干涉形成的光栅也会产生伪像。三个真像出现在物体的原位置上,而六个伪像有的部分重叠在真像上面,有的出现在真像附近,其各自的衍射角度由光栅的色散关系决定。如果重现时,不用三基色光,而用白光,那么就不仅仅是三个真像和六个伪像了,而是三套光栅衍射产生的三套色散像光谱的重迭。由于这些称之为串色像(Cross-talk Image)的伪像的存在,使得彩色全息像的质量大大下降。因此,要获得高质量的彩色全息像,就必须消除串色干扰。

对于透射全息,已采用过频率多路^[1~3]、空间多路^[4]、对参考光编码^[4]和场孔径分割^[5]等方法。这些方法使串色干扰的问题得到了一定程度的解决,但也带来了像场受限、分辨率和信噪比低等问题,而且不能进行白光重现。

七十年代,M. T. Gale 和 K. Knop^[6] 等人将 E. N. Leith 和 J. Upatnieks^[1] 早年为使真像和串色像分离,把不同基色的参考光以不同角度入射到全息图上的思想付诸实践,记录了二维彩色全息图;再现时,用狭缝选择再现基色波段和滤掉串色像的空间频谱,实现了白光重现。可是由于全息图本身对各再现基色波段内不同波长的色散作用,这种方法得到的彩色像和彩虹全息一样具有色模糊问题。

Benton 发明的彩虹全息术引进彩色全息^[7]之后,以牺牲不太重要的垂直视差为代价,利用白光重现,获得了亮度高、色彩逼真、具有水平视差的三维彩色像。由于狭缝的作用,使得真像和串色像的衍射角度分离,从而可在原狭缝处观察到不受串色干扰的真像。但是当眼睛垂直离开原狭缝位置时,将观察到串色像。

理论上反射全息术是制作彩色全息图的最佳方法。利用反射全息图波长灵敏度高的特点,不但能消除串色干扰,而且可以实现白光重现。然而,反射全息图具有一些其它问题。由于干涉条纹的间距非常窄(红光的条纹间距约为 $0.2 \mu\text{m}$),为获得亮度高噪声低的像,就必须使用高分辨率的记录材料。另一个问题是记录材料在定影过程中的收缩。由于收缩,引起干涉条纹间距变窄,条纹的立体结构变形,使得重现像的色彩向蓝色移动,同时也使衍射效率下降。因此,彩色反射全息术有待于全色高分辨率抗收缩的新记录材料的出现。虽然近来有人用敏化的重铬酸明胶制作出了高质量的夹层反射彩色全息图^[8],但是其制作工艺复杂,只适合在实验室制作。

本文提出利用体积位相透射全息图的角度灵敏度消除串色干扰、制作像面彩色全息图和利用全息光栅白光重现这种彩色全息图的新方法。根据 Kogelnik^[9] 关于体积全息图的耦合波理论,体积位相透射全息图的角度灵敏度高,而波长灵敏度低。利用这一点,根据角度灵敏度的要求,记录时把三基色参考光分别按照不同角度入射到全息干板上。制作好的全息图,当用与三基色参考光束的空间频率相同的三基色普通光束照射时,将重现原物体的三维彩色像。这种

方法不但能消除串色干扰,而且具有分辨率和衍射效率高的优点。因为利用三个全息光栅从垂直入射的白光中选择出三个再现基色波段,并衍射转换成分别和三基色参考光的空间频率相等的再现光束,所以这种白光再现方法获得的三维彩色像没有色模糊。

2 制作像面彩色全息图的原理和方法

根据 Kogelnik^[9] 关于体积全息图的耦合波理论,对于无损耗位相型体积透射全息光栅,其衍射效率为

$$\eta = \sin^2(\nu^2 + \xi^2)^{1/2} / (1 + \xi^2/\nu^2) \tag{1}$$

式中参量 ν 和 ξ 为

$$\nu = \pi n_1 d / \lambda (C_R C_S)^{1/2} \tag{2}$$

$$\xi = (d/2C_S)\Theta \tag{3}$$

其中, $C_R = \cos\theta$; $C_S = \cos\theta - (K/\beta)\cos\psi$; $K = 2\pi/\Lambda$, $\beta = 2\pi n/\lambda$;

$$\Theta \equiv K\cos(\psi - \theta) - (K^2/4\pi n)\lambda \tag{4}$$

在上面的式子中, C_R 和 C_S 为倾斜因子, d 为光栅厚度, K 为光栅矢量的模, ψ 为光栅矢量和 z 轴的夹角, Λ 为光栅周期, n 为平均折射率, n_1 为折射率调制度, λ 和 θ 分别为再现光的波长和入射角, Θ 是决定再现光偏离布拉格条件程度的相移度量。图 1 画出了从方程(1)的标准化形式得到的结果,图 2 和图 3 分别为全息光栅的记录和再现的示意图。

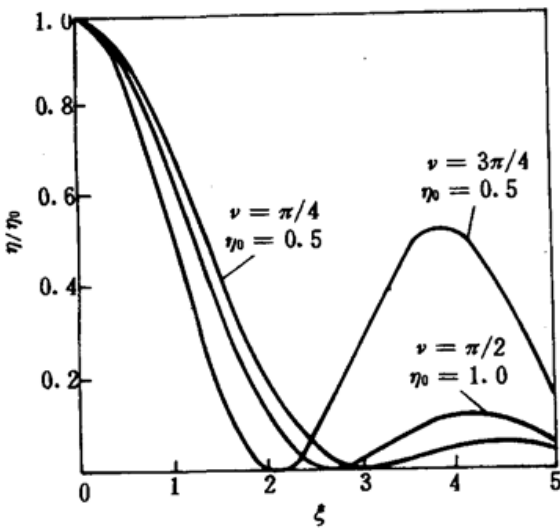


Fig. 1 Normalized diffraction efficiencies as a function of ξ

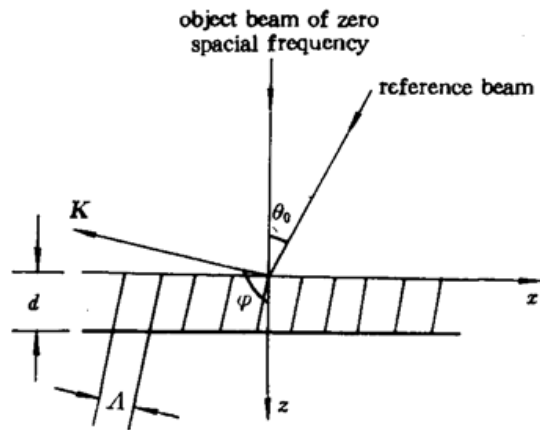


Fig. 2 Recording schematic. The wavelength and angle of the reference beam are λ_0 and θ_0 respectively

设 $\theta = \theta_0$ 和 $\lambda = \lambda_0$ 时,再现光满足布拉格条件,有

$$2\Lambda n \cos(\psi - \theta_0) = \lambda_0 \tag{5}$$

将(5)式代入(4)式,可得 $\Theta = 0$ 。根据(3)式和图 1,可知此时衍射效率 η 达到最大值。再现光不满足布拉格条件时,有 $\theta = \theta_0 + \Delta\theta$ 和 $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$ 。此时将(4)式代入(3)式,并取泰勒展开的一次项

$$\xi = (d/2C_S)[K\sin(\psi - \theta_0)\Delta\theta - (K^2/4\pi n)\Delta\lambda] \tag{6}$$

根据(1)式,全息光栅的衍射效率是 ξ 的函数。从图 1 可以看到,当 $m \xi m \approx 3$ 时,衍射效率 $\eta \approx$

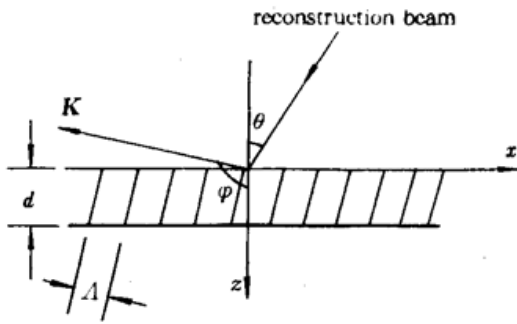


Fig. 3 Reconstructing schematic. The wavelength and angle of the reconstruction beam are λ and θ

时,使 $|\xi| = 3$ 的波长偏离为 $\lambda = 86.5 \text{ nm}$ 。

以上结果表明体积位相透射全息图的角度灵敏度高,而波长灵敏度低。利用这一性质,记录时,按照角度灵敏度的要求,把三基色参考光束分别以不同的角度入射到全息干板上,于是在同一层乳胶中记录了三个分全息图。经过冲洗漂白,当用和参考光相同的再现光照射此全息图时,各基色再现光只对三个分全息图中的一个满足布拉格条件,衍射出相应基色的真像;同时,这一基色再现光对其余两个分全息图的衍射效率,由于角度灵敏度而接近于零。例如,绿色再现光只对记录了物体的绿色信息的分全息图满足布拉格条件,衍射出物体的绿色真像;而绿色再现光从记录了物体的红色信息和蓝色信息的分全息图中衍射出的两个绿串色像由于角度灵敏度而被消除了。

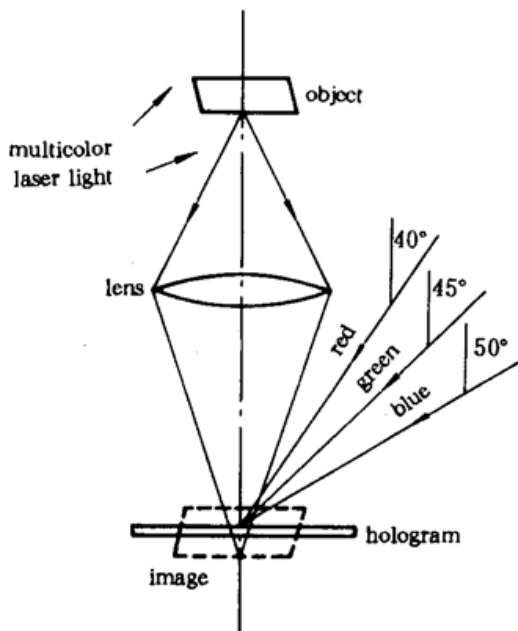


Fig. 4 Schematic of recording the image color hologram

0。

根据(6)式,选 Kodak-649F 全息干板和氩离子激光器的输出波长 $\lambda_0 = 514.5 \text{ nm}$,计算和比较体积位相透射全息图的角度灵敏度和波长灵敏度。设参考光束在空气中的入射角度为 45° ,则乳胶中的折射角度为 $\theta_0 = 27.34^\circ$ 。Kodak-649F 全息干板的乳胶厚度和折射率分别为 $d = 17 \mu\text{m}$ 和 $n = 1.54$ 。根据以上选好的参量,可得其他各参量为 $\psi = 103.66^\circ$, $\Delta = 0.7 \mu\text{m}$, $K = 8.88 \mu\text{m}^{-1}$, $C_s \approx 1$ 。把这些参量代入(6)式,可得,当 $\lambda = \lambda_0$ 时,使 $|\xi| = 3$ 的角度偏离为 $\Delta\theta = 2.34^\circ$;当 $\theta = \theta_0$

根据以上的讨论结果,设计了制作像面彩色全息图的光路,见图4。在图4中,各基色参考光束之间的夹角在乳胶中为 2.34° ,即在空气中为 5° 就足够了。从图4中三基色参考光束的角度顺序可以看出,这种方法除了主要利用角度偏离布拉格条件来消除串色像外,还稍微利用了波长偏离布拉格条件。因为根据(6)式, $\Delta\theta$ 和 $\Delta\lambda$ 同号,不利于 $|\xi|$ 的增长,因而不利于消除串色像;而 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\lambda$ 减异号,有利于 $|\xi|$ 的增长,也有利于消除串色像。

3 白光重现的原理和方法

要用白光重现这种彩色全息图,关键是从白光中分离出红、绿、蓝三个再现基色波段,并且使它们的空间频率分别等于三基色参考光束的空间频率。这一点可以利用三个全息光栅来实现。

图5是制作全息光栅的示意图。制作全息光栅的激光波长和光的入射角度应该和制作像面彩色全息图时相等。把制作好的全息光栅按照‘红’、‘绿’、‘蓝’的顺序依次平行排列在像面彩色

全息图的右上方,见图 6。当白光垂直照射在全息光栅上时,就可实现白光重现这种彩色全息图。这种白光再现方法的实质是,利用三个全息光栅从垂直入射的白光中选择出三个再现基色波段,并衍射转换成分别和三基色参考光的空间频率相等的、入射到彩色全息图上的再现光束。因为每个全息光栅对其选择的再现基色波段内不同波长的色散,预先补偿了或校正了彩色全息图本身对再现基色波段的色散,所以这种白光再现方法获得的三维彩色像没有色模糊。也就是说这种方法利用了色散补偿^[10,11]。

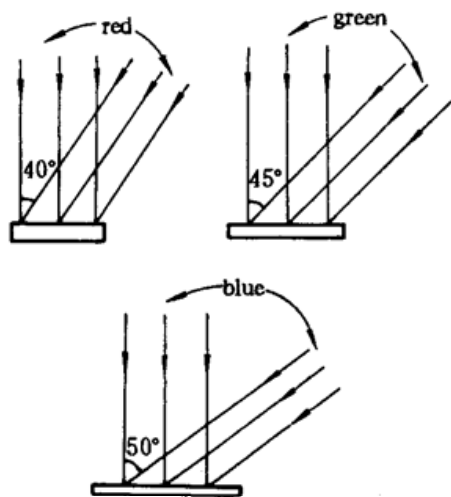


Fig. 5 Schematic of making the three holographic gratings

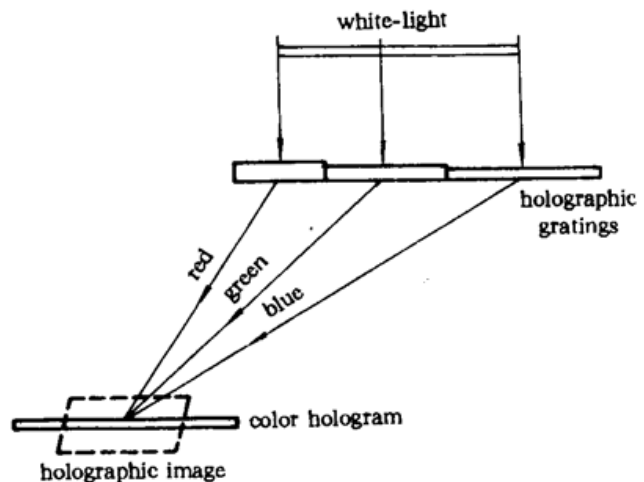


Fig. 6 Schematic of reconstructing the image color hologram with white-light

因为全息光栅的波长灵敏度,即全息光栅衍射出的波段宽度,是随着全息光栅的厚度、和记录全息光栅的两束光之间的夹角的增加而减小,并随着记录全息光栅的波长的增大而增大^[9],所以为了使彩色全息像的三个颜色获得相近的彩度和亮度,‘红’、‘绿’、‘蓝’三个全息光栅的厚度应该依次递减。

4 结 论

本文提出了利用体积位相透射全息图的角度灵敏度消除串色干扰、制作像面彩色全息图,和利用全息光栅进行波段选择和色散补偿、白光重现这种彩色全息图的新方法。此方法可以通过选择全息光栅的厚度、控制重现像的彩度和亮度,并在白光重现时,可以同时或分别显示物体的三基色信息。可以预期,这种彩色全息图不但能消除串色像,而且具有衍射效率与分辨率高和色彩逼真的优点。因为可使用卤化银乳胶全色全息干板,所以这种方法易于推广。这种方法还可以从像面全息术推广到一般的体积透射全息术中去。

参 考 文 献

- 1 E. N. Leith, J. Upatnieks, *J. Opt. Soc. Amer.*, **54**, 1295(1964)
- 2 L. Mandel, *J. Opt. Soc. Amer.*, **55**, 1697(1965)
- 3 E. Marom, *J. Opt. Soc. Amer.*, **57**, 101(1967)
- 4 R. J. Collier, K. S. Pennington, *Appl. Opt.*, **6**, 1091(1967)
- 5 R. A. Lessard, P. Langlois, A. Boivin, *Appl. Opt.*, **14**(3), 565(1975)
- 6 M. T. Gale, K. Knop, *Appl. Opt.*, **15**(9), 2189(1976)
- 7 P. Hariharan, *Progress in Optics XX*, 283(1983)

- 8 T. Kubota, *J. Optics (Paris)*, **22**(6), 267(1991)
 9 H. Kogelnik, *Bell Syst. Tech. J.*, **48**, 2909(1969)
 10 C. B. Burckhardt, *Bell Syst. Tech. J.*, **45**, 1841(1966)
 11 D. J. DeBitetto, *Appl. Phys. Lett.*, **9**, 417(1966)

力科光电有限公司向国内外用户致意

力科光电有限公司是经营光电产品为主的专业公司,公司以优质的技术服务,最佳的品质服务于国内外用户,一个电话或一封信,您的需要就得到满足。

力科公司向您提供:

1. 非线性晶体: KTP, ADP, KDP, DKDP, LI, LBO 等和这些晶体制作的二倍频器、三倍频器、四倍频器、Q 开关等;
2. 用于微电子和光电子器件的衬底和外延片 (MOCVD 和 MBE);
3. 激光晶体: Nd: YAG, Nd: YVO₄, Nd: YAP, Cr: Mg₂SiO₄, Ti: Al₂O₃;
4. 声光晶体: LN, PbMoO₄, LT, TeO₂, Li₂B₄O₇;
5. 光学材料: CaF₂, BaF₂, MgF₂, NaCl, KBr, KCl;
6. 各种光学调整架,各种光学元件的夹具,激光电源,超微光摄像机, ZJD-003 型激光打孔机,激光图像通讯机, TXK 人体死后时间测定仪,便携式激光痕迹检查仪,便携式多波段激光痕迹检查仪,半导体激光报警器;
7. 提供您在济南的各种服务,如住宿,车票,接待。车票请提前四天电告 831365。力科公司将在全国各地招聘业务员,愿者请来信来电,待遇从优。
8. 力科公司愿与各界同仁通力合作,可为厂矿、企业推销产品,请寄说明书和合作意向。

力科光电有限公司
 济南市七里河路 32 号
 邮 编: 250100
 联系人: 祁建平
 传 真: 0531-837760
 电 话: 0531-831365

上海联系电话: 4701390-207 陈以超
 9534890-262 冯贤平
 传真: (021)9528885
 北京联系电话: 7711177-722 李 港
 传真: 7714088