

- 144—153.
- [8] T. Sotomura et al, Progress In Batteries & Solar Cells Vol. 2, ed. by A. Kozawa et al., JEC Press Inc. Publ, (1979), 44—49.
- [9] G. C. Farrington et al., U.S.P., 3,976, 505; 3,994, 747; 4,058, 889; 4,105, 833. (1976).
- [10] J. R. Rea et al., Proc. of Symposia on Power Sources for Biomedical Implantable Application and Ambient Temperature Lithium Batteries, ed. by B. B. Owens et al., The Electrochemical Society Inc. Publ., (1980), 245—253.
- [11] C. C. Liang et al., *J. Applied Electrochemistry*, 8 (1978), 445—454.
- [12] T. Takahashi et al., *J. Electrochem. Soc.*, 122 (1975), 83.
- [13] T. Takahashi et al., *J. Applied Electrochemistry*, 7 (1977), 37.
- [14] T. Matsui et al., *J. Electrochem. Soc.*, 124 (1977), 941—944.
- [15] S. Geller et al, *Phys. Rev. B*, 19 (1979), 5396—5402.
- [16] B. B. Owens, Proc. 1st Solid Electrolyte Symposium (1976).

全息光学元件

徐 昆 贤

(上海激光技术研究所)

全息光学元件是一种有别于经典光学元件(反射或折射型)的衍射光学元件^[1,2]。由于它是薄膜型光学元件,因此有重量轻、性能可靠、制造方便、成本低等特点。它特别适用于“准单色光系统”和激光系统。如果全息光学元件与经典光学元件相结合,还能扩展和改善光学系统的性能和应用范围。因此它已成为全息术的一个重要发展方面。

一、全息光学元件的理论基础 ——衍射光学

1. 理论模型

由于全息光学元件是两束(或两束以上)激光相干涉的衍射全息图,因此广义上可把它的理论模型看作是一种变间距的衍射光栅。对衍射光学元件来说,成象特性和衍射效率是两个主要考虑的问题。成象特性(如光焦度、象的位置和象差)主要取决于全息图表面的条纹间距分布,而衍射效率则由特定的条纹形状或条纹的体积分布决定^[3]。光栅可以有若干衍射级。多衍射级意味着产生多个成象波前。因此如何分离所需衍射象波是一个重要问题。一般可用空间分离(离轴运用)和效率分离(平面全息图

的闪烁效应和体积全息图的布拉格效应)来达到分离所需衍射象波的目的。但我们通常仅对一级衍射感兴趣。

2. 基本的分析方法

(1) 波前匹配法

考虑由元件所衍射的衍射光,在经过后继光学系统后,衍射象波到达某一区域的波前形状与参考球面的偏离来分析象差。

图1是由点源R发出的发散球面波和点源O的会聚球面波所记录的轴上全息图。再现时用偏置角 α 的点源C发出的光束作为再现光束。

由图1(a)有物波和参考波的位相差为

$$\varphi_O - \varphi_R = \frac{2\pi}{\lambda_O} [(R_R^2 + x^2)^{\frac{1}{2}} - R_R + (R_O^2 + x^2)^{\frac{1}{2}} - R_O]. \quad (1)$$

由图1(b)有再现波的三级位相为

$$\varphi_C = \frac{2\pi}{\lambda_C} [(R_C^2 + 2xR_C \sin \alpha + x^2)^{\frac{1}{2}} - R_C], \quad (2)$$

则实际波前的三级位相为

$$\Phi_P = \varphi_O - \varphi_R + \varphi_C. \quad (3)$$

在 α_1 下的参考球面的位相为

$$\Phi_R = \frac{2\pi}{\lambda_c} [(R_1^2 + 2xR_1 \sin \alpha_1 + x^2)^{\frac{1}{2}} - R_1]. \quad (4)$$

实际波前的三级位相项与理想波前的三级位相项的失配即为赛德三级象差。

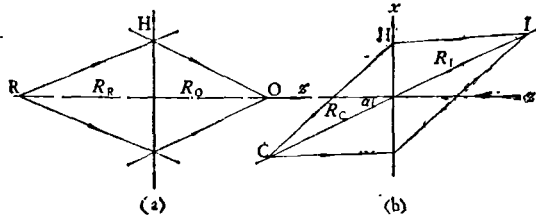


图1 全息图记录和再现
(a) 为轴上全息图的记录;
(b) 为以偏置角 α 的点源再现

波前误差为

$$\frac{2\pi W}{\lambda_o} = \Phi_P - \Phi_R = (\varphi_C + \varphi_O - \varphi_R) - \Phi_R. \quad (5)$$

把(5)式按平方根展开, 在径向平面由 x 二次项匹配得象散为

$$W^{(2)} = -\frac{x^2 \sin^2 \alpha}{2f_s}, \quad (6)$$

其中,

$$\frac{1}{f_s} = \frac{1}{R_R} + \frac{1}{R_O}. \quad (7)$$

横向角象散^[4]为

$$\frac{\partial W^{(2)}}{\partial x} = -\frac{x \sin^2 \alpha}{f_s}. \quad (8)$$

x 三次项匹配得彗差为

$$W^{(3)} = \frac{x^3 \cos^2 \alpha \sin \alpha}{2} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_C^2} \right). \quad (9)$$

横向角彗差为

$$\frac{\partial W^{(3)}}{\partial x} = \frac{3x^2 \cos^2 \alpha \sin \alpha}{2} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_C^2} \right). \quad (10)$$

x 四次项匹配得球差为

$$W^{(4)} = \frac{x^4}{2} \left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_C^3} \right). \quad (11)$$

横向角球差为

$$\frac{\partial W^{(4)}}{\partial x} = 2x^3 \left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_C^3} \right). \quad (12)$$

(2) 光线追迹法^[5]

如图2所示, 包含在图示平面内的参考光束 R 和物光束 O 分别以 α_R 和 α_O 角入射在全息图表面上. 则在全息图上条纹的局部位置可由 α_R, α_O 入射的二个平面波来描述:

$$(O + R)(O + R)^* = 2[1 + \cos(\alpha_O - \alpha_R)]. \quad (13)$$

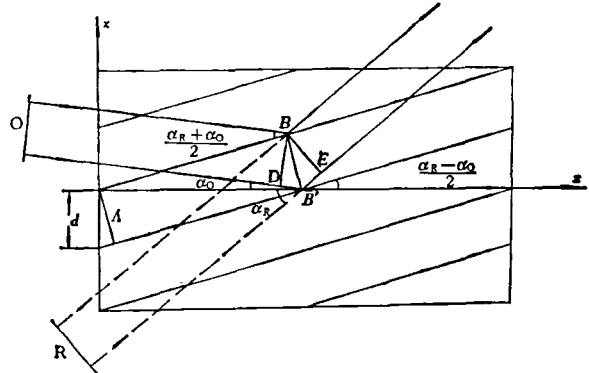


图2 两平面波形成的光栅结构

由上式表示的条纹平面是垂直于图面, 并相交于 $\alpha_R + \alpha_O$ 的二等分角. 条纹平面的垂直距离, 即峰值强度面的空间周期为

$$\Lambda = \frac{\lambda_o}{2 \sin \left(\frac{\alpha_R + \alpha_O}{2} \right)}. \quad (14)$$

沿全息图的条纹间距为

$$d = \frac{\Lambda}{\cos \left(\frac{\alpha_R - \alpha_O}{2} \right)} = \frac{\lambda_o}{(\sin \alpha_R + \sin \alpha_O)}, \quad (15)$$

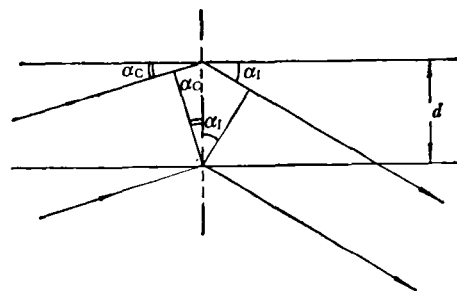


图3 再现时把全息图视为光栅

再现时象波方向由光栅方程

$$d(\sin \alpha_c + \sin \alpha_1) = n\lambda_c \quad (16)$$

决定(图3), 式中, n 为衍射级次, λ_c 为再现波长. 由(15), (16)式得

$$\sin \alpha_1 = \frac{n\lambda_c}{\lambda_0} (\sin \alpha_R + \sin \alpha_0) - \sin \alpha_c, \quad (17)$$

上式就是光线追迹法的基本公式。

(3) 等效光栅模型的光栅象差分析

全息光学元件的象差,特别是彗差和象散,随着偏置角增加而增加。它的这种特性可以由代表离轴全息图的平均条纹间距的光栅结构(图4)来说明。

该均匀光栅的间距,在 α 角入射时衍射角也为 α (满足 $2d \sin \alpha = \lambda$)。如果使入射角有小角度 ϕ_1 变化,则衍射角相应地有 ϕ_2 变化。根据图4表示的几何关系,其光栅方程为

$$d\{\sin(\alpha - \phi_1) + \sin[\alpha + (-\phi_2)]\} = \lambda. \quad (18)$$

当 $\phi_2 < 1$ 时,上式经简化后得

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{1}{2} \phi_1^2 \tan \alpha. \quad (19)$$

在光栅孔径上 $\Delta\phi$ 的变化量就代表其横向角象差。

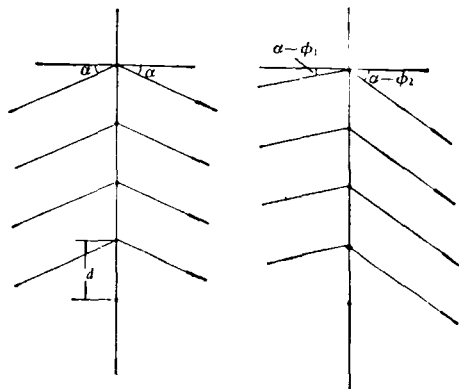


图4 等效于离轴全息图的等间距的光栅结构

(a) 偏置角 α 越大, ϕ_1 变化越大,则 $\Delta\phi$ 增大,故横向角象差越大。

(b) 对于平面波,有不变的偏置角, ϕ_1 为常数。因此 $\Delta\phi=0$;对于球面波, $\phi_1 = c_0 + c_1 x$,若主光线以 α 的对称角入射,则 $c_0 = 0$,这时象散等于零,彗差不等于零。

(c) 已知分离衍射级条件是 $\alpha > 0$ (或空间频率 $\nu > 0$)。当给定全息图数值孔径 $\sin \psi$ 时,由图5可知,为了分离衍射级,物光束和参考光束的夹角必须满足 $\alpha - \psi > 0$,则

$$\alpha > \psi. \quad (20)$$

因此,当全息图数值孔径 ψ 增加时,偏置角 α 也要随之增加。故象差也就增加。所以离轴元件的象差正比于其数值孔径 $\sin \psi$ 。

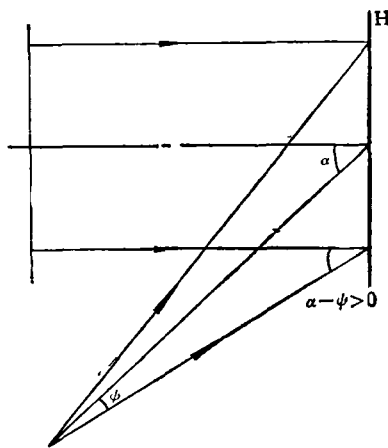


图5 全息图数值孔径 ψ 和偏置角 α

二、全息光学元件技术

1. 设计分析技术

在进行元件设计时首先遇到的是它的象差理论问题。由于全息光学元件一般不是像典型光学透镜那样的旋转对称系统,而是双轴系统^[6]。这种对称性的降低使得其象差一般是不能线性相加的,从而导致更复杂的象差计算。另一方面,若考虑到非球面全息光学元件^[7,8]和实际的全息记录材料的影响,问题就更为复杂。此外,常规光学元件与全息元件的结合^[9]以及非点源记录光束的使用也增加了象差分析的复杂性。

关于全息光学元件的设计,一般采用电子计算机光线追迹法。目前主要有两种设计想法:一是共轭点置换法^[10];二是等效透镜法^[11]。

设全息光学元件的等效透镜有一极高的折射率($n > 100$),因此它的表面曲率半径很大,其光焦度很小。等效透镜一般为双曲面透镜(图6)。

等效透镜折射率为

$$n_r = \frac{m\lambda_r}{\lambda_c} (n_c - 1) + 1,$$

$$(n_c = 11, 101, 1001, \dots), \quad (21)$$

顶点曲率半径为

$$\begin{aligned} r_1 &= (n_c - 1)Z_c, \\ r_2 &= (n_c - 1)Z'_c. \end{aligned} \quad (22)$$

双曲面的圆锥常数为

$$K = K' = -n_c^2 + 2, \quad (23)$$

式中, m 为衍射级, Z_c, Z'_c 为等效透镜物象共轭距, λ_r 为再现波长, λ_c 为记录波长。

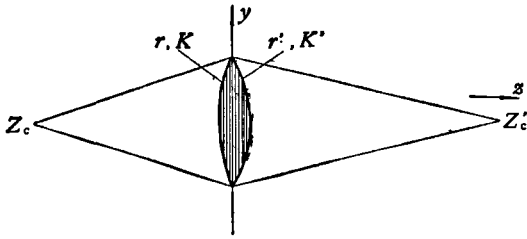


图6 全息光学元件的等效透镜

2. 记录材料

全息光学元件对记录材料的依赖性很大。用于制造全息光学元件的记录材料, 主要考虑的全息参数是衍射效率、角和光谱选择性、信噪比、厚度变化和环境稳定性等。其中衍射效率尤其重要。近年来对记录材料的广泛研究表明: 由于重铬酸盐明胶^[12-15] 具有衍射效率高、分辨率高等许多全息方面的优良特性, 因此是目前用于制造全息光学元件的最佳材料。

3. 制造和评价技术

要制造最佳的全息光学元件, 一方面要有大功率单频输出的氩离子激光器和保持长期曝光稳定性(达 1/10 干涉条纹)的防震台, 必要时还须加伺服回路以提高干涉条纹动力学稳定性。另一方面基片必须要有精确的定位。记录时还要注意热平衡, 防止空气扰动和声激励等。此外还要求有极严格的记录和处理步骤。这里特别要强调的是要有高质量的基片、超净化室设备和十分复杂的涂层装置。

最后, 全息光学元件要进行准直工作。这是检验能否达到设计所预期的成象特性的一个重要步骤。一般可使用干涉术和经过改进的常

规光学测试技术(例如, Hartman 法、星点法、纹影法和鉴别率板等)来评价元件的成象性能。

三、全息光学元件的应用

1. 目视显示——飞行员平视显示器

一种典型的平视显示器的光学系统包括一个阴极射线示波管、准直光学元件和一块交联玻璃。这种结构受到视场和效率两方面的限制。全息光学元件用于该系统就能放松这两种限制。如果用一个全息透镜代替交联玻璃, 由于全息透镜的双重特性(即兼有准直和分束的功能), 则在平视显示器光学系统中的准直透镜和交联玻璃合二为一。因此, 一块全息准直-交联玻璃将增大瞬时视场, 使之有可能接近于全视场。体积位相反射全息图的效率主要取决于全息图的厚度和折射率调制量。因此控制厚度和折射率调制量就可使体积位相全息图有可能达到较高的衍射效率。

2. 全息扫描元件

全息扫描器^[16]是一种用来偏转和扫描激光光束的全息光学元件。它是借助于全息图的移动来控制激光束的扫描花样。这种衍射扫描原理与反射或折射扫描相比, 具有高速高分辨率和多方向性的扫描能力以及其偏转扫描自由度很高等优点, 而且成本低, 适于大量生产。它在信息处理、图象输入、输出等方面已显示了它的潜力。如超级市场百货编码全息扫描器^[17]以及激光印刷、激光材料加工^[18]等都已获应用。

全息扫描器还可以用计算机产生全息图来制作, 其优点是允许记录有可变扫描速率和扫描方向, 并有复杂扫描花样的扫描器, 不要对 10.6 μm 敏感的红外记录介质。

3. 用于全息显示的多重成象元件——全息屏幕^[19]

全息显示的一个重要方面是全息电影。全息电影放映原理如图7所示。其中的全息屏幕实质上是一种全息多象元件, 它具有聚焦和多

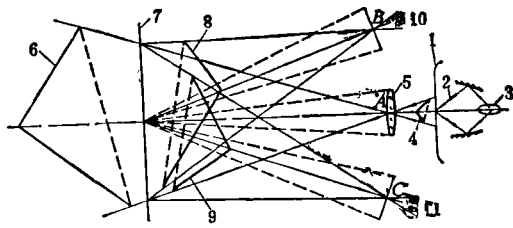


图7 全息电影的放映原理

1. 影片; 2. 共轭照明光束; 3. 光源; 4. 再现实象;
5. 放映镜头; 6, 8, 9. 放大的空间象; 7. 全息屏
幕; 10, 11. 观察区域

重成像性质,即它能分裂投影在其上的空间象,并能把象聚焦在银幕前(后)空间位置(图8).当位于主焦点处的全息图通过光学系统投影在全息屏幕上,就能形成其中心位于次焦点处的若干同心光束.处于该位置的观众就可看到屏幕前(后)的三维象.

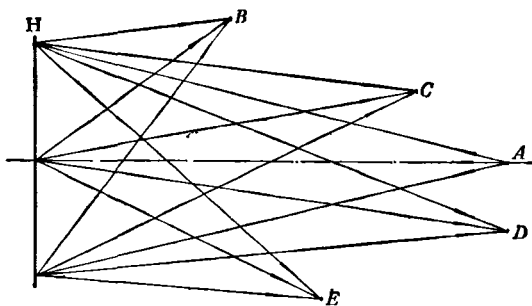


图8 全息屏幕成像原理

A为主焦点; B, C, D, E为次焦点

4. 用作光学信息处理的傅里叶变换透镜

从光学处理器件的发展看,一般光学透镜,无论从体积、重量方面,还是从装置稳定性方面,均不能满足目前急速发展的空间科学和电子技术发展的需要.尤其是为了满足实时处理的需要,必须发展小型、稳定的光学装置.因

此,用全息透镜取代傅氏变换透镜是一个发展方向^[20].全息透镜有聚焦、分束和光谱滤波等多种功能,有高衍射效率,宽的角度和光谱带宽以及低的光学噪声,故能充分满足光学信息处理的要求.

总之,全息光学元件是一种新型光学元件,它在光学信息处理、全息存储、激光扫描、三维显示和象差校正等方面均有重要应用前景.同时它将对光学技术的革新和边缘信息学科的发展带来积极的影响.

参 考 文 献

- [1] Yu. S. Mosyakin and G. V. Skrotskii, *Sov. J. Quantum Electron.*, **2**(1972), 199.
- [2] D. H. Close, *Optical Eng.*, **14**(1975), 408.
- [3] H. Kogelnik, *Bell Syst. Tech. J.*, **48**(1969), 2909.
- [4] J. L. Rayces, *Opt. Acta*, **11**(1964), 85.
- [5] J. N. Latta, *Appl. Opt.*, **10**(1971), 2698.
- [6] H. A. Buchdahl, *J. Opt. Soc. Am.*, **62**(1972), 1314.
- [7] W. T. Welford, *Opt. Commun.*, **8**(1973), 239.
- [8] W. T. Welford, *Opt. Commun.*, **9**(1973), 268.
- [9] B. J. Lin and S. A. Collins, *J. Opt. Soc. Am.*, **63**(1973), 537.
- [10] R. J. Fredricks, *S. P. I. E. Journal*, **7**(1969), 106.
- [11] W. C. Sweatt, *Proc. SPIE*, **126**(1977), 25.
- [12] H. M. Smith (Ed.), *Holographic Recording Materials*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, (1977).
- [13] B. J. Chang and C. D. Leonard, *Appl. Opt.*, **18**(1979), 2407.
- [14] B. J. Chang, *Opt. Commun.*, **17**(1976), 270.
- [15] Andrejs Graube, *Photogr. Sci. & Eng.*, **22**(1978), 37.
- [16] Ivan Cindrich, *Appl. Opt.*, **6**(1967), 1531.
- [17] B. J. Chang, et al, *Holosphere* **7**(1978), 1.
- [18] D. K. Campbell and D. W. Sweeney, *Appl. Opt.*, **17**(1978), 3727.
- [19] V. G. Komar, *Pros. SPIE* **20**(1977), 127
- [20] J. R. Fienup and C. D. Leonard, *Appl. Opt.*, **18**(1979), 631.