

1 第5章光学全息

1.1 全息光学概述

1.2 波前记录与再现

1.2.1 波前记录

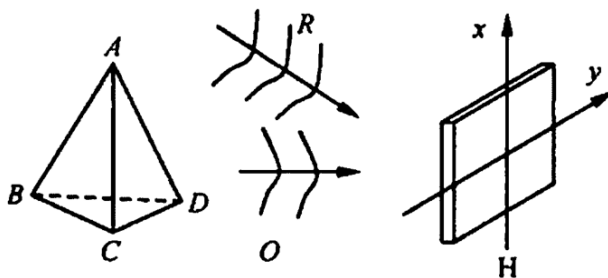


图 1: 波前记录

1. 用干涉方法记录物光波波前

必须设法把相位信息转换成强度变化才能记录。干涉法是将空间相位调制转换为空间强度调制的标准方法。

物光波为

$$O(x, y) = |O(x, y)| \exp[-j\varphi(x, y)], \quad (1)$$

参考光为

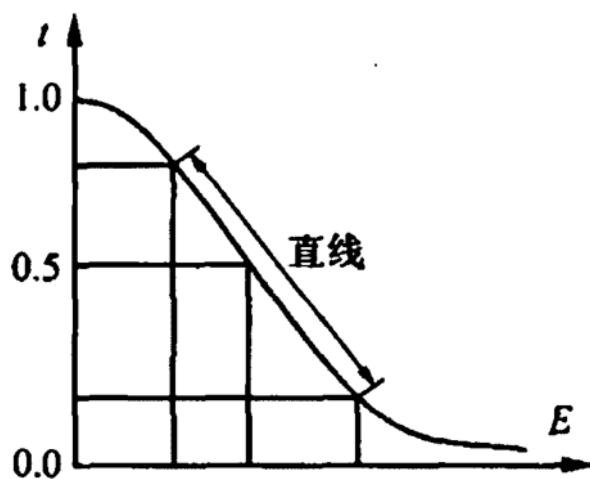
$$R(x, y) = |R(x, y)| \exp[-j\psi(x, y)], \quad (2)$$

总光强为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |R(x, y) + O(x, y)|^2 \\ &= |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + R(x, y)O^*(x, y) + R^*(x, y)O(x, y) \end{aligned} \quad (3)$$

或者

$$I(x, y) = |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + 2|R(x, y)||O(x, y)|\cos[\psi(x, y) - \varphi(x, y)]. \quad (4)$$

图 2: 负片的 $t-E$ 曲线

2. 记录过程的线性条件 假定全息干板是一个线性变换器，并且有足够高的分辨率，以便能记录全部入射的空间结构。则其振幅透过率为

$$t(x, y) = t_0 + \beta E = t_0 + \beta [\tau I(x, y)] = t_0 + \beta' I(x, y). \quad (5)$$

其中 β' 为曝光时间 τ 和斜率 β 的乘积，对于负片和正片 β' 分别为负值和正值。假设参考光的强度在整个记录表面是均匀的，那么

$$t(x, y) = t_0 + \beta' (|R|^2 + |O|^2 + RO^* + R^*O) = t_b + \beta' (|O|^2 + RO^* + R^*O). \quad (6)$$

其中 $t_b = t_0 + \beta' |R|^2$ ，表示均匀偏置透过率。

1.2.2 波前再现

1. 衍射效应再现物波波前

假设落在全息图平面上的复振幅为 $C(x, y)$ ，则透过全息图的光场为

$$\begin{aligned} U(x, y) &= C(x, y)t(x, y) = t_b C + \beta' O O^* C + \beta' R^* C O + \beta' R C O^* \\ &= U_1 + U_2 + U_3 + U_4. \end{aligned} \quad (7)$$

其中我们将 C 、 O 、 O^* 视为波前函数，他们各自的系数视为一种波前变换或一种运算操作。如果系数含有二次相位，则相当于波前经过了

一个透镜聚散；如果系数中出现了线性因子，则相当于波前经过了一个棱镜的偏转；如果两者兼有，则说明经过了棱镜和透镜。

(a) U_1 系数 $t_b = t_0 + \beta' R^2$ ，其中参考光常用平面波或简单的球面波，近似常数；

(b) U_2 系数含有 O^2 ，代表振幅受到调制的照明波前，也就是 C 波经历 $O^2(x, y)$ 分布的底片的衍射，适当调整照明度，可以使其成为次要因素；

以上两个分量基本保留了照明光的特性，成为全息图衍射场的 **0 级波**

(c) 当照明光波与参考光波完全相同 $C = R$ 时，

$$U_3(x, y) = \beta' |R|^2 O(x, y), \quad (8)$$

U_3 系数除了相差常数因子 R^2 外，是物光波的准确再现，并且由于原始物光波是发散的，所以是物体的**虚像**，此称为全息图衍射场中的 **+1 级波**；

(d) 当照明光波与参考光波完全相同 $C = R$ 时，

$$U_4(x, y) = \beta' R^2 O(x, y), \quad (9)$$

此时 R^2 中的相位因子一般无法消除，此项称为全息图衍射场中的 **-1 级波**。

只有当照明光波与参考光均为正入射平面波时，此时 ± 1 级光波才严格镜像对称，此时共轭光产生的实像对于观察者而言凹凸与原物体正好相反，称为**赝像**。

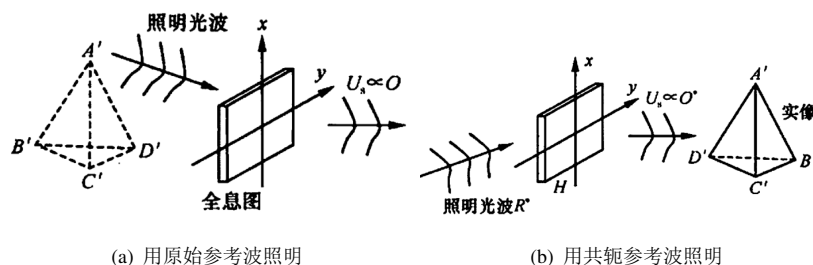


图 3: 波前再现

2. 波前再现过程的线性性质

- 若把波前记录和波前再现的过程视为一种系统变换，那么记录的物波场为输入，再现波场为输出，这样的系统实现的变换是高度非线性的。
- 若把记录的物波前视为输入，再现时的投射场的单项分量作为输出，那么对应系统就是线性系统。

1.2.3 全息图的基本类型

- 物光和参考光是否同轴：同轴全息、离轴全息；
- 物体与全息图片的相对位置：菲涅尔全息图、像面全息图、傅里叶变换全息图；
- 记录介质的厚度：平面全息图、体积全息图。

1.3 同轴全息图和离轴全息图

1.3.1 同轴全息图

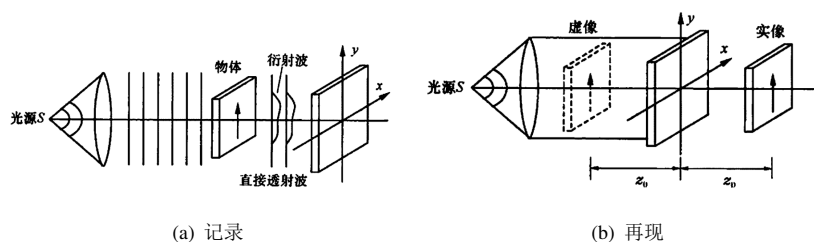


图 4: 同轴全息图的记录与再现

假设相干平面波照明一个高度透明的物体，透射光场可以表示为

$$t(x_0, y_0) = t_0 + \Delta t(x_0, y_0), \quad (10)$$

其中， t_0 是一个很高的平均透射率， Δt 表示围绕平均值的变化， $|\Delta t| \leq |t_0|$ 。

透射光场可以看做两项组成：

- 由 t_0 表示的、强而均匀的平面波，相当于波前记录时的参考波；
- 有 Δt 表示的弱散射波，相当于波前记录时的物光波。

在距离物体距离 z_0 处防止全息图干板时曝光光强为

$$I(x, y) = |R + O(x, y)|^2 = |R|^2 + |O(x, y)|^2 + R^*O(x, y) + RO^*(x, y). \quad (11)$$

线性记录条件下, 全息图振幅透过率正比于曝光光强

$$t(x, y) = t_b + \beta' (|O|^2 + R^*O + RO^*). \quad (12)$$

若用振幅为 C 的平面波垂直照明全息图, 则透射光场可用四项场分量之和表示为

$$U(x, y) = Ct(x, y) = Ct_b + \beta' C |O(x, y)|^2 + \beta' R^*CO(x, y) + \beta' RCO^*(x, y). \quad (13)$$

- 第一项是均匀衰减的平面波;
- 第二项正比于弱的散射光的光强, 可以忽略不计;
- 第三项正比于 $O(x, y)$, 再现原始物光波前, 产生原始物体的一个虚像;
- 第四项正比于 $O^*(x, y)$, 在虚像对称位置产生物体的实像。

特点:

- 四项场分量都在同一方向上传播;
- 直接透射光降低了像的衬度;
- 虚像实像构成不可分离的孪生像, 降低了全息像的质量;
- 最大局限: 必须假定物体是高度透明的, 否则第二项场分量将不可忽略。

1.3.2 离轴全息图