

# 全息显示屏制作过程中 DCG 胶膜厚度的理论设计

马跃<sup>1</sup>, 孙忠云<sup>1</sup>, 赵永安<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041; 2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:** DCG 膜层的厚度是影响全息显示屏光学性能指标的一个重要因素。在分析了 DCG 全息图膜厚的变化及其不均匀光栅结构的基础上, 应用分层介质膜理论对其进行了理论设计。并提出了均匀光学厚度的假设, 应用计算机仿真给出了理论计算的结果。将理论与实验结果进行比较, 从而验证了均匀光学厚度的假设是正确的。

**关键词:** 全息显示屏; 重铬酸盐明胶; 衍射效率

**中图分类号:** TQ59792    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1009-3516(2001)02-0055-03

全息显示屏是全息平视显示系统中的一个重要元件, 其理论模型是全息窄带滤光片。在我们的研制项目中要求全息显示屏的窄带(20 nm)反射率大于 80%, 白光透射率大于 80%。为了达到上述的性能指标, 我们采用重铬酸盐明胶(DCG)作记录介质。该材料具有折射率调制能力大、衍射效率高、透明度好、信噪比高等诸多优点, 广泛用于全息光学元件领域。1985年 Duncan 曾以 DCG 作为记录介质制成了工作于近红外区域的滤光片。国内也有用 DCG 制成衍射效率达 86%, 最小带宽为 4 nm 的反射滤光片的报道<sup>[1]</sup>。

按照耦合波理论, 介质膜厚度越大, 全息显示屏的衍射效率越高; 按照分层介质膜理论, 增加介质膜的厚度还可以减少全息图的衍射带宽<sup>[2]</sup>。我们在研制全息显示屏时也发现, 在一定范围内增加介质膜厚度可以提高衍射效率, 减少带宽, 但如果厚度过大, 介质对光的吸收和散射也增加, 沿厚度方向曝光和处理的不均匀性也增加, 全息显示屏的质量急剧下降。为此, 首先确定全息显示屏的 DCG 膜厚是必要的; 而且, 只有首先确定 DCG 膜厚, 才能从理论上指导我们在制备 DCG 胶液时对其配方进行改进, 使之符合课题要求。因此, 从理论上确定 DCG 膜厚是整个课题的第一工作。

## 1 DCG 全息图膜厚的变化及其不均匀光栅结构

DCG 全息图在一般的处理情况下, 胶膜的厚度都会产生膨胀, 使全息图的再现波长比记录波长增加 20% 左右。胶膜厚度的变化可以用 DCG 的成像机制来解释: DCG 干版曝光后, 感光部分发生光化学反应, 使明胶变硬, 胶膜的强曝光部分和弱曝光部分的硬度变化就形成了全息图的潜像。显影时, 多孔结构的明胶吸水体积膨胀, 弹性大, 硬度小。在异丙醇中脱水时, 异丙醇分子置换了水分子, 使明胶体积收缩, 硬度变大, 但体积相对于干燥的明胶仍然是膨胀的。当异丙醇挥发后, 明胶进一步收缩, 体积变小, 由于光化学反应, 明胶丧失了一部分弹性, 不会变为原来的厚度, 因此, 明胶干燥后都会产生膨胀, 使全息图的再现波长比记录波长增加。

另外, DCG 感版对记录光存在吸收作用。DCG 对记录光的吸收主要决定于重铬酸盐的浓度。在重铬酸盐的浓度是 20%, 膜层厚度为 20  $\mu\text{m}$  的情况下, 干版对 488 nm 激光的吸收接近 50%。由于吸收的存在, 记录时在膜层内部参考光、物光的光强比是不同的。这样, 导致沿膜层法线方向的曝光量是不均匀的造成明胶硬度的不均匀变化<sup>[3]</sup>。在随后的显影处理中, 由于明胶硬度不同, 吸水膨胀不同, 脱水收缩也不同, 加之处理时沿明胶厚度方向显影速率不同的影响<sup>[4]</sup>, 导致折射率调制的不均匀。我们对实际制作的全息图测试分

收稿日期: 2000-09-26

基金项目: 海军装备部科研计划项目(HZ99309)

作者简介: 马跃(1964-), 男, 辽宁丹东人, 讲师, 硕士, 主要从事光全息与光信息处理研究。

析,发现从空气-胶膜面到胶膜-基底面,折射率调制度由大到小变化,如图1所示,并且变化的大小受 DCG 干版的初始硬度、曝光量、处理梯度等因素影响。

## 2 胶膜厚度的理论设计

体积分相型反射全息图的结构模型如图1所示。记录过程中,参考光束与物光束干涉的结果形成了驻波干涉的周期分布,因此,在记录介质内部交替地产生强曝光面和弱曝光面。经显影及定影处理后,介质的折射率出现周期性变化,其中,折射率的极大值对应于强曝光面,极小值对应于弱曝光面,在全息图内部形成沿光栅矢量方向周期性变化的折射率调制。把具有这种折射率分布结构的全息图看作是折射率高低交替变化的分层光学介质膜系,那么就可以应用薄膜干涉理论加以分析。这就是分层介质膜理论模型的基本思想。

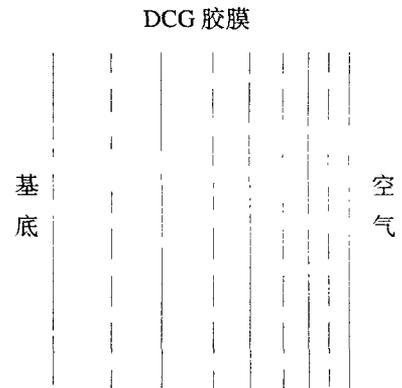


图1 DCG 全息图实际光栅结构图

由于前面所述的原因,实际制作的 DCG 反射全息图的折射率调制和调制面间距的变化是不均匀的,对分层介质膜理论模型来说,即相当于一折射率和厚度变化的不规则膜系。对不规则膜系光学特性的分析,要分别计算每一膜层的特征矩阵,过程复杂、计算量大。而且,我们要对全息图内部每一部分的折射率和条纹间距的变化归纳总结出确定的规律是不可能的。我们注意到,从空气-胶膜面到胶膜-基底面,折射率调制度由大到小变化,而条纹间距由小到大变化,这两种变化导致光在介质中传播的光程几乎不发生变化,为此,我们大胆地提出了均匀光学厚度的假设。具体方法是假设折射率仍旧按照余弦形式调制,条纹间距仍是均匀的,而把平均的折率调制振幅作为余弦调制振幅,把平均的调制面间距作为条纹间距。

为了获得精确的计算结果,我们把折射率调制的一个周期又平均分为 10 个厚度相等的子膜层,每个子膜层的折射率为

$$n_i = n_0 + n_1 \sin \varphi_i \quad (1)$$

式中,  $\varphi_i = \frac{2i-1}{10} \pi$  ( $i=1,2,3,\dots,10$ );  $n_0$  为全息图的平均折射率,  $n_1$  折射率调制振幅为平均调制振幅的值。

每个子膜层的厚度为 
$$d_i = \Lambda \sigma / 10 \quad (2)$$

式中,  $\Lambda$  为理论条纹间距,与记录光路形式有关;  $\sigma$  为条纹间距的平均膨胀系数。

一个子膜层的特征矩阵为 
$$M_i = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $m_{11} = \cos \beta_i$ ,  $m_{12} = -\frac{j}{P_i} \sin \beta_i$ ,  $m_{21} = -jP_i \sin \beta_i$ ,  $m_{22} = \cos \beta_i$ ,  $\beta_i = 2\pi n_i d_i \cos \theta_i / \lambda$ ,  $P_i = n_i \cos \theta_i$ ,  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\theta_i$  为再现光在第  $i$  个面的折射角,  $\lambda$  为记录波长。

一个周期的特征矩阵为 
$$M_p = \prod_i^{10} M_i \quad (4)$$

整个膜系的特征矩阵为 
$$M = M_p^N = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $N = T_0 / \Lambda \sigma$ ,  $T_0$  为所求得 DCG 干版的膜厚。

由此,便可以计算出整个膜系的反射率<sup>[2]</sup>为 
$$R = \left| \frac{(A + BP_g)P_0 - (C + DP_g)}{(A + BP_g)P_0 + (C + DP_g)} \right|^2 \quad (6)$$

式中,  $P_0 = n_0 \cos \theta_0$ ,  $P_g = n_g \cos \theta_g$ ,  $n_0$ 、 $n_g$  分别是全息图及基底材料的折射率,  $\theta_0$ 、 $\theta_g$  分别是光的入射角。

最终可以计算出整个膜系的透射率为 
$$T = 1 - R \quad (7)$$

根据上述的处理思想,我们利用可视化编程工具 C++ Builder 4.0 编制了计算程序,结合我们在实验中确定的各参数,对不同记录光波长、不同记录入射角、不同膜厚、不同照明光入射角等情况进行了模拟。在经过大量实验确定了最佳的 DCG 胶液配方、干版的制备工艺、记录光路和显影处理工艺的情况下,在对矩阵的乘幂进行计算时采用了挈比雪夫多项式算法,相应的数据由全息显示屏的实际情况决定,具体地取  $n_0 = 1.52$ ,  $n_g = 1.56$ ,  $n_1 = 0.04$ , 条纹间距的平均膨胀系数为  $\sigma = 0.5$ 。

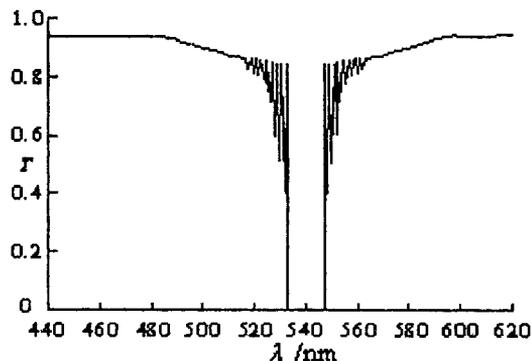


图2 计算机模拟最佳结果

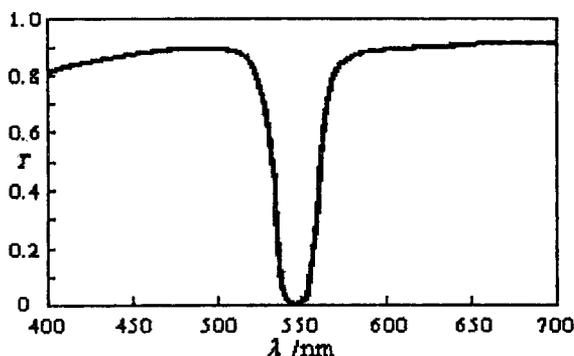


图3 全息显示屏衍射特性曲线

### 3 结束语

图2是对反射中心波长为544 nm的全息显示屏进行模拟计算得到的最佳结果,相应的参数如下,记录波长为488.0 nm,DCG膜厚度为20 μm,窄带反射率为100%,其它波段透射率为90%。

图3是根据上述参数制作的全息显示屏的光谱透射率曲线。

以上两图的比较可知理论与实际相吻合。具体地说,实际测定全息显示屏的透射率最大值为95.8%,比理论计算结果高;反射率的最大值为99.6%,比理论计算结果低;反射带宽最窄处为15 nm,比理论结果好,中心波长为547 nm,与设计要求的544 nm略有差异,这是因为理论计算时所设计的模型仍是理想化的,与实际情况还有一定的差距,因此有必要在今后的工作中对这一模型作进一步研究。另外,在制作全息显示屏的过程中,由于对各参数的控制并不十分严格,工艺也不稳定,干扰因素很多,这也是造成理论与实践略有差异的原因之一。总的来说,“均匀光学厚度”的假设是正确的,它不仅使计算得以简化,而且也为我们进一步了解DCG胶膜的微观机制并对此进行定量计算,从而指导实验提供了帮助。这一假设还有待于在今后的实践中得到检验。

#### 参考文献:

- [1] 唐卫国,刘大禾,黄婉云. 反射式全息滤光片的带宽和考虑记录介质吸收后的衍射效率[J]. 光学学报,1988,8(2):152-156.
- [2] 刘大禾,周静. 体积全息图机制的再认识[J]. 光学学报,1997,17(7):919-922.
- [3] Boj P G, Crespo J. Broadband reflection holograms in dichromated gelatin[J]. App Opt,1992,31(17):3302-3305.
- [4] Bahuguna R D,Beaulieu J. Reflection display holograms on dichromated gelatin[J]. App Opt,1992,31(17):6181-6182.

## Theoretical Analysis of Film Thickness of DCG in Manufacturing Holographic Display Screen

MA Yue<sup>1</sup>, SUN Zhong-yun<sup>1</sup>, ZHAO Yong-an<sup>2</sup>

(1. Qingdao Branch Institute of Navy Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041, China;

2. The Engineering Institute of the Air Force Engineering University(AFEU.), Xi'an 710038, China)

**Abstract.** Thickness of DCG film is one factor influencing the technical targets of holographic display screen. The change of the thickness of holographic film and the uneven grating structure are analyzed. With the help of Multi-layer Optical Theory, its theoretical design is conducted. And the assumption is raised that optical thickness interval in the film is uniform. The computer-simulation gives us the result of theoretical calculation, which is compared with that of the experiment. In this way we have proved that the assumption of optical thickness is correct.

**Key words.** holographic display screen; dichromated gelatin; diffract on efficiency