

文章编号: 0258-7025(2002)11-0975-04

记录角度对光聚物全息存储布拉格偏移的影响

黄明举^{1,2}, 姚华文¹, 陈仲裕¹, 侯立松¹, 干福熹¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 河南大学物理系, 河南 开封 475001)

提要 推导了光聚物全息存储布拉格偏移与记录角度的关系公式, 数值计算的结果与实验符合很好。结果表明, 光聚物全息存储的布拉格偏移与记录角度有比较大的关系, 对于倾斜光栅, 记录过程中参物光夹角越小, 布拉格偏移越大。该结果对光聚物高密度全息存储器光路的设计有参考意义。

关键词 高密度全息存储, 光聚物, 布拉格偏移

中图分类号 TP 333.4+2; TB 877 文献标识码 A

Relationship of Bragg-mismatch and Recording Angles of Holographic Photopolymer

HUANG Ming-ju^{1,2}, YAO Hua-wen¹, CHEN Zhong-yu¹, HOU Li-song¹, GAN Fu-xi¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² Department of Physics, Henan University, Kaifeng, Henan 475001)

Abstract In this paper the relationship of Bragg-mismatch and recording angles of holographic photopolymer is deduced, and compared with the experimental result. It showed that the theory tallied with the experiment well. The result indicated that with the decrease of the angle between reference beam and object beam, the Bragg-mismatch increases, this result is important to the design of photopolymer holographic memory system.

Key words high-density holographic storage, photopolymer, Bragg-mismatch

1 引言

光致聚合物(光聚物)因为具有高灵敏度、高衍射效率、高信噪比、低成本、易于合成和不需要后处理等特点,成为目前高密度全息存储材料的研究热点^[1~4],但它在曝光过程中的缩皱所引起的一系列问题一直是人们所关注的^[5]。布拉格偏移就是这种缩皱所引起的主要问题之一,布拉格偏移即读出时最大衍射效率对应参考光的角度偏离记录时参考光的角度。引起光聚物这种缩皱的原因既有材料自身的原因,也有记录过程中曝光条件的原因,如 Uh-Sock Rheem 等研究了曝光过程中曝光量和曝光时间对布拉格偏移性的影响^[6]。我们在高密度全息

存储的实验研究过程中发现,随着记录时参物光夹角的减小,读出时参考光的布拉格角度的偏移明显地增加,而现有的文献没有人对此做过研究。因此,我们根据体全息光栅形成的光学条件推导了全息存储过程中,由材料缩皱效应所引起的布拉格偏移与记录时参物光入射角度间关系的公式,并用数值计算的结果与实验进行了比较,理论计算和实验结果符合很好,这对光聚物高密度全息存储器研究中光路的设计很有意义。

2 公式推导

由于全息存储使用的光聚物厚膜一般都是固定

收稿日期 2001-10-29

作者简介 黄明举(1965—),男,河南大学物理系副教授,中科院上海光学精密机械研究所 2000 级博士生,主要从事高密度数字全息存储方面的研究。E-mail: hmingju@163.net

在两块玻璃基底中间,同时因其中掺有预聚物交联剂等,干膜膜层横向跟玻璃基底结合相当牢固,与纵向相比材料在横向上发生形变的可能性较小,因此曝光过程所引起的缩皱效应主要发生在膜的厚度上面。所以,我们的理论推导假设曝光过程中只有膜的厚度发生了变化。图 1 是光聚物厚膜透射全息图因样品厚度的变化所引起的体光栅变化的示意图,图中 θ_r 和 θ_s 分别为记录时介质外参考光和物光与光聚物样品法线的夹角, d 为膜的厚度 $(1-\alpha)d$ 为曝光缩皱之后膜的厚度, α 为曝光所致膜厚收缩的百分比, β 为体光栅矢量与膜法线的夹角。为了直观,图中对膜厚的变化有些夸张。

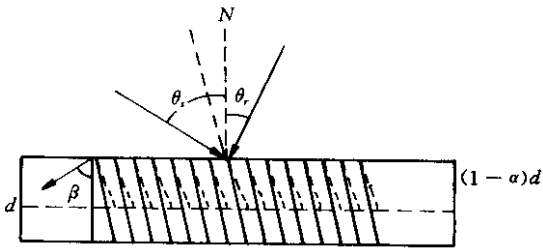


图 1 膜厚变化引起的体光栅变化示意图

Fig.1 Sketch map of volume grating changing with thickness

根据以上说明,若设曝光前光聚物样品的折射率为 n_0 ,则容易由折射定律得到记录时介质内参考光和物光分别与样品法线的夹角为 $\arcsin(\sin\theta_r/n_0)$ 和 $\arcsin(\sin\theta_s/n_0)$,于是可得到光栅方程

$$2\Lambda_0 n_0 \sin\left\{ \frac{\arcsin(\sin\theta_r/n_0) + \arcsin(\sin\theta_s/n_0)}{2} \right\} = \lambda \quad (1)$$

其中 Λ_0 为光栅周期, λ 为记录所用波长。由图中几何关系知

$$\beta = \pi/2 - [\arcsin(\sin\theta_r/n_0) - \arcsin(\sin\theta_s/n_0)]/2 \quad (2)$$

若用 β' 和 Λ_1 分别表示曝光缩皱后光栅矢量与膜法线的夹角和光栅周期,则由样品横向无缩皱的假设可由图中的几何关系得

$$d \tan(\pi/2 - \beta) = (1-\alpha)d \tan(\pi/2 - \beta') \\ \Lambda_0 / \cos(\pi/2 - \beta) = \Lambda_1 / \cos(\pi/2 - \beta')$$

故

$$\beta' = \arctan[\tan\beta(1-\alpha)] \quad (3)$$

$$\Lambda_1 = \Lambda_0 \sin\beta' / \sin\beta \quad (4)$$

读出时,经曝光之后光聚物样品的折射率用 n_1 表示,则对缩皱后周期为 Λ_1 ,折射率为 n_1 的光栅满

足布拉格条件的读出光束在介质内的入射角度应为

$$\theta = \arcsin[\lambda/(2\Lambda_1 n_1)] + \beta' - \pi/2 \quad (5)$$

换算为介质外的布拉格角度为

$$\theta_2 = \arcsin(n_1 \sin\theta) \quad (6)$$

而如果没有缩皱,则对周期为 Λ_0 ,折射率为 n_0 的光栅,同样应得到读出光在介质外的布拉格角度为

$$\theta_1 = \arcsin(n_0 \sin\theta') = \theta_r \quad (7)$$

因此,由缩皱效应引起的布拉格偏移可表示为

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \theta_2 - \theta_r \quad (8)$$

将(1)~(7)式代入(8)式即可得到布拉格偏移与记录条件及光聚物厚度收缩的关系。从结果可以看出布拉格偏移除了与光聚物厚度收缩百分比和折射率变化有关外还与记录时参考光和物光的入射角度有关。

3 实验

为了验证上述理论,我们用自己合成的光聚物厚膜作了测量记录角度对布拉格偏移影响的实验,样品的合成方法参见文献[7];厚膜的成膜方法是将光聚物溶液先滴涂到一块玻璃基底上,在暗室中室温下干燥 24 h 之后再用另一块相同的玻璃将厚膜覆盖,固定好之后继续干燥 48 h 成为光聚物干膜样品,注意固定时要保证两块玻璃基底的平面完全平行。经测量膜厚为 330 μm ,样品折射率聚合前为 1.5,聚合后为 1.502。

实验所用光路如图 2 所示。图中 Laser 是记录和读出所用激光器(Ar^+ , 514 nm),M 是反射镜,BM 是分束镜,它将光束分为上面支路的物光束和下面支路的参考光束,SH 是快门,PM 是激光功率计,VM 是由控制器 C 控制的可以改变反射角度的振镜,L 是焦距为 f 的傅里叶透镜,H 是由两块玻璃基底固定的光聚物全息厚膜,VM 和 H 均距 L 两倍焦距 $2f$,以保证样品上参考光的光斑不随振镜反射的参考光方向而发生变化。记录时保持参考光的方向与样品法线方向夹角 $\theta_r = 45^\circ$,左右移动物光支路的反射镜使物光与样品法线夹角 θ_s 分别为 $-15^\circ, -5^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ$ 和 45° (负角度表示物光与参考光在样品法线的同侧,正角度表示二者在样品法线的异侧),在样品上不同位置记录不同的全息光栅,每一次记录所用激光功率均为 15 mW,分光比为 1:1,曝光时间为 30 s,曝光时间过长是为了让样品中的单体充分聚合,以免聚合不够完善对实验结果产生影响。

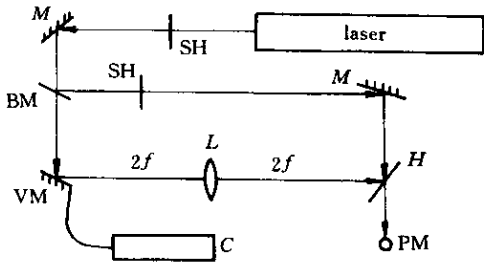


图 2 实验所用光路图
Fig.2 Experimental setup

测量布拉格偏移时是每一次记录过后，保持样品位置不变，关闭物光支路，改变振镜的控制电压来改变参考光的角度，振镜控制电压与振镜偏转角度的关系是 $\pm 5 \text{ V}$ 对应 $\pm 7^\circ$ ，线性变化，这样通过控制电压即可计算振镜的偏转角度，由图中的几何关系知道，读出衍射效率最大时振镜的偏转角度即布拉格偏移量。每一次读出所用激光功率均为 40 mW ，衍射效率定义为衍射光强与读出参考光强的比值。

4 实验结果及与理论比较

图 3 是在 $\theta_r = 45^\circ, \theta_s = 35^\circ$ 时上述记录和读出条件下归一化衍射效率随布拉格偏移的变化关系曲线，归一化衍射效率是每一个读出角度的衍射效率与最大衍射效率的比。其中实线是按照衍射理论^[8]计算的曲线，而点线是实验测得的曲线，从中可以看出此时确实存在着布拉格偏移现象，由衍射理论曲线知道在上述条件下布拉格角度选择性为 0.22° ，而实验测得的布拉格偏移为 0.09 ，在原布拉格角度（图中的 0° ）实测的衍射效率只是偏移后布拉格角度处所测得的最大衍射效率的 4% ，可见如果在实际应用中不考虑光聚物的布拉格偏移性会严重影响全息图再现的衍射效率。实验中没有测量衍射旁瓣的衍射效率，是因为主要关心的是衍射效率最大时布拉格偏移的情况。

上面仅是对一个固定的记录角度测量布拉格偏移的情况，图 4 给出了不同记录角度下布拉格偏移的变化情况，图中实线是按照 (8) 式计算的理论结果，点线是实验测得的结果。计算过程中参数取值为： $n_0 = 1.5, n_1 = 1.502, \alpha = 0.011$ ；为了便于与实验进行比较，取 $\theta_r = 45^\circ$ ，只让 θ_s 变化计算布拉格偏移。从计算结果可以明显看出，随着记录过程中参考光和物光夹角的减小，全息记录的布拉格偏移在增加，而在记录时参物光互相垂直即 θ_r 和 θ_s 均为

45° 时布拉格偏移为 0 ，表明对称记录的是非倾斜光

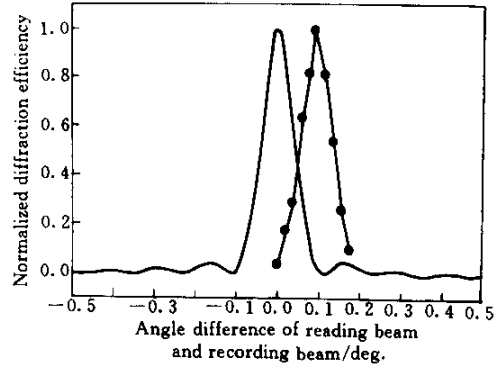


图 3 归一化衍射效率随布拉格角度偏移的曲线
Fig.3 Normalized diffraction efficiency vs Bragg-mismatch

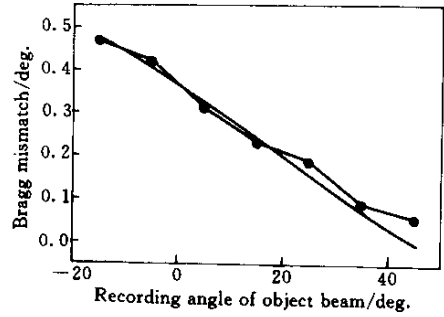


图 4 布拉格偏移与记录角度的关系
Fig.4 Bragg-mismatch vs recording angle θ_s

栅。样品曝光收缩所引起的厚度的变化不能够引起布拉格偏移，这在图 1 中也很容易看出，因为此时光栅条纹垂直于样品的表面，与法线平行，仅仅厚度的变化不能改变光栅条纹的上述性质，光栅矢量的方向没有发生变化，所以没有布拉格偏移。这个结论也正是用记录非倾斜光栅方法不能确定光聚物全息曝光厚度收缩效应的原因^[6]。

从图 4 实验曲线和计算曲线的比较看，二者基本符合，只是在上述参物光垂直记录的非倾斜光栅时所测得的数值并不为 0 ，原因一方面可能是在记录过程中由于光线方向和样品的放置存在着误差，导致实际记录的并不是理想的非倾斜光栅，因此不可能测到为 0 的布拉格偏移；另一方面可能在实际记录过程中存在着横向的收缩效应，改变了光栅周期，因此也存在着布拉格偏移。实验曲线和计算曲线的吻合程度说明了上述公式的推导是比较合理的，也说明了光聚物在体全息记录过程中布拉格角度的偏移与记录时参考光和物光的入射角度有着比较密切的关系。

5 结 论

用理论和实验的方法研究了光聚物全息存储过程中记录角度对全息图再现时布拉格偏移的影响,结果表明,对于倾斜光栅,减小记录过程中参考光和物光的夹角,会引起布拉格偏移的增大,不利于高密度全息存储的角度复用技术的使用,因此在设计光聚物高密度体全息存储的光路时必须考虑记录角度的这一影响。

致谢 感谢上海激光技术研究所唐春明研究员为本文的实验提供振镜。

参 考 文 献

- 1 Allen Pu, Demetri Psaltis. High-density recording in photopolymer-based holographic three-dimensional disks [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(14) : 2389 ~ 2398
- 2 Raymond K. Kostuk. Dynamic hologram recording characteristics in DuPont photopolymers [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(8) : 1357 ~ 1363
- 3 Celia Garcia, Inmaculada Pascual, Antonio Fimia. Diffraction efficiency and signal-to-noise ratio of diffuse-object holograms in real time in polyvinyl alcohol photopolymers [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(26) : 5548 ~ 5551
- 4 S. Martin, C. A. Feely, V. Toal, Holographic recording characteristics of an acrylamide-based photopolymer [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(23) : 5757 ~ 5768
- 5 R. M. Shelby, D. A. Waldman, R. T. Ingwall. Distortions in pixel-matched holographic data storage due to lateral dimensional change of photopolymer storage media [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(10) : 713 ~ 715
- 6 Uh-Sock Rheem, H. John Caulfield, Chandra S. Vikram *et al.*. Dynamics of hologram recording in DuPont photopolymer [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(5) : 846 ~ 853
- 7 Huang Mingju, Yao Huawen, Chen Zhongyu *et al.*. Study of high-density holographic characteristics of a novel green-sensitive photopolymer [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2002, **29**(8) : 748 ~ 750 (in Chinese)
- 8 Herwig Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1969, **48**(9) : 2909 ~ 2947